



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**Kahden erilaisen julkisivurakenteen
rakennusfysikaalinen vertailu korkean rakentamisen
olosuhteissa**

Santeri Schroderus

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Syyskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Kahden erilaisen julkisivurakenteen rakennusfysikaalinen vertailu korkean rakentamisen olosuhteissa

Santeri Schroderus

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2020, 165 s. + 3 liitettä

Työn ohjaajat yliopistolla: Matti Kangaspuoskari & Hannu Liedes

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää kumpi kahdesta eri julkisivurakenteesta oli lämpö- ja kosteustekniseltä toiminnaltaan parempi vaihtoehto korkean rakentamisen olosuhteisiin. Tavoitteena oli saada selville kosteusteknisesti vauriosietokykyisempi ja luotettavampi rakenne. Tutkittaviksi julkisivurakenteiksi valikoitui betonisandwich-elementti ja kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu kehitystyön alla olevien kohteiden perusteella. Työssä suoritettiin ensiksi kirjallisuuskatsaus, jonka jälkeen tutkittavista rakenteista laadittiin 2D-simulaatiomallit COMSOL Multiphysics -simulointiohjelmalla. Simulaatiot suoritettiin tunnin välein muuttuvalla ilmastodatalla rakenteen eteläpuoleiselle julkisivulle yhden vuoden ajalta. Simulaatioiden ilmastona käytettiin Ilmatieteen laitoksen Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden tulevaisuuden ilmastoa.

Rakenteista luotiin vauriottomat ja vauriolliset mallit, joita vertailtiin kriittisiksi valituissa tarkastelupisteissä keskenään lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden perusteella. Tarkastelupisteet valikoituivat homehtumisherkkyyden ja kosteuden kondensoitumisen todennäköisyyden perusteella suurimmiksi osin paksun mineraalivillakerroksen ulkopuoliseen rajapintaan molemmissa rakenteissa. Rakenteiden vaurioiksi valittiin todennäköisimpiä asennusvaiheen työteknisistä epäonnistumisista aiheutuvia vauriotapauksia. Betonisandwich-elementin vauriotapaukseksi valittiin kahden elementin välisessä pystysaumassa oleva 2 mm levyinen rako. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun vaurioiksi valikoitui kaksi vauriotapausta. Ensimmäinen vaurio oli rakenteen sisäpuolella oleva 2 mm levyinen rako, josta sisäilman kosteus pääsi rakenteen sisään. Toinen vauriotapaus sisälsi edellisen vaurion lisäksi rakenteen ulkopuolella olevan 2 mm raon, josta ulkoilman kosteus pääsi rakenteen sisään.

Kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu osoittautui simulaatioiden pohjalta vaurioherkäksi rakenteeksi. Yksistään pelkkä vaurio rakenteen sisäpuolella, josta sisäilman kosteus pääsi rakenteen sisään aiheutti simulaation lopun suhteellisen kosteuden pysymisen simulaation alun tasolla. Rakenne ei siis kuivunut simulaation aikana. Toisessa kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun vauriotapauksessa, jossa sekä sisä- ja ulkoilman kosteus pääsivät rakenteen sisään suhteellisen kosteuden arvot olivat koko simulaation ajan korkeampia kuin vauriotapauksessa, jossa pelkästään sisäilman kosteus pääsi rakenteen sisään. Kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu ei kuivunut kummassakaan vauriotapauksissa. Kuitenkin vauriottomassa tapauksessa kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu toimi kosteusteknisesti hyvin. Rakenteen suhteellinen kosteuspitoisuus laski alku- ja lopputilan välillä vuoden mittaisen simulaation aikana. VTT:n parannetun homemallin perusteella homeindeksin arvo ei kuitenkaan vuoden mittaisen simulaation pohjalta saavuttanut kriittiseksi asetettua arvoa 1,0 missään tutkitussa tapauksessa.

Betonisandwich-elementti osoittautui kosteusteknisesti toimivaksi rakenteeksi vaurioituneenakin. Ulkokuoren pystysaumassa sijaitseva vaurio tuulettui tuuletusuraan, josta kosteus pääsi poistumaan rakenteesta ulos virtaavan ilman mukana. Betonisandwich-elementin vauriottomalla ja vauriomallilla ei havaittu olevan suurta eroa kosteusteknisessä toimivuudessa. VTT:n parannetun homemallin perusteella rakenne ei ollut homehtumisherkkä. Homeindeksi ei saavuttanut kriittiseksi asetettua arvoa 1,0. Betonisandwich-elementti osoittautui varmemmaksi ja turvallisemmaksi rakenteeksi kuin kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu kosteusteknisen toimivuuden ja vauriosietokyvyn osalta korkean rakentamisen olosuhteissa. Kyseinen kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu osoittautui riskialttiimmaksi vaihtoehdoksi korkean rakentamisen olosuhteisiin kyseisillä tutkituilla vauriotapauksilla heikon vauriosietokyvyn takia.

Tämä diplomityö antaa lukijalle laajan teoreettisen pohjan yhdistettyyn lämmön ja kosteuden siirtymiseen sekä yleiseen rakennusfysikaaliseen teoriaan. Työssä esitetään matemaattisesti kaikki oleellimmat lämmön ja kosteuden varastoitumis- ja siirtymistavat, joita tarvitaan epälineaarisia ajasta riippuvia simulaatiomalleja rakentaessa. Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää hyödyksi kehitystyön alla olevissa sekä tulevaisuuden hankkeissa päätöksenteon tukena. Työ antaa suunnittelijoille ajantasaista tietoa kyseisten rakenteiden riskipaikoista, sekä mihin erityisesti on tärkeää kiinnittää huomiota julkisivurakenteen valintaa tehdessä lukuisista valmistajien erilaisista

vaihtoehtoista. Työssä luotuja COMSOL-simulaatiomalleja pystytään jatkossa käyttämään hyödyksi tutkittaessa erilaisten rakenteiden ja vauriotapauksien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa.

Asiasanat: rakennusfysiikka, lämmön ja kosteuden siirtyminen, julkisivu, korkea rakentaminen, COMSOL Multiphysics

ABSTRACT

Building physical comparison of two different façade structures under high-rise climate conditions

Santeri Schroderus

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2020, 165 p. + 3 Appendixes

Supervisors at the university: Matti Kangaspuoskari & Hannu Liedes

The aim of this thesis was to determine which of two façade structures is better in terms of heat and moisture transfer in high-rise buildings in Finland. The aim was also to find a more moisture-resistant and damage-resistant structure for high-rise climate conditions. The two façade structures were a concrete sandwich element and a lightweight façade system. A literature review provided the basis for 2D simulation models. The simulations were performed in the COMSOL Multiphysics modelling software. Simulations for the southern façade were performed over a one-year period using hourly-changing climate data. The data were taken from the Finnish Meteorological Institute's Vantaa 2030 building physical test year.

Damage-free and damage models were created from the structures and were compared at critical observation points in terms of heat and moisture transfer. The observation points were selected based on mold susceptibility and the probability of condensation. In both structures, these points were mostly outside the thick layer of mineral wool. The most probable types of damage due to technical failure during the installation phase were selected for each structure. For the concrete sandwich element, a 2 mm wide gap in the vertical seam between the two elements was chosen. For the lightweight façade system, two types of damage were selected. The first was a 2 mm wide gap on the inner side of the structure through which indoor air moisture could enter the structure. The second type of damage included the first type as well as a 2 mm gap on the outer side of the structure through which outdoor air moisture could enter the structure.

The results of the simulations showed that the lightweight façade system was more sensitive to damage than the concrete sandwich element. The first type of damage caused

the relative humidity to remain constant throughout the simulation. In other words, during the one-year simulation, the structure did not dry out. For the second type of damage in which indoor and outdoor air moisture both entered the structure, the relative humidity values were higher throughout the simulation than they were for the first type of damage. The lightweight façade system did not dry out in either of the two damage cases. When it was undamaged, however, the lightweight façade system performed well in terms of moisture transfer. The structure dried out during the one-year simulation. Based on the VTT's improved mold model, however, the value of the mold index based on a one-year simulation did not reach the critical value of 1.0 in any of the cases.

The concrete sandwich element proved to be a moisture-proof structure even when damaged. The damage in the vertical seam of the outer shell was vented into the ventilation groove from which moisture could escape by convection. The damage-free and damage models did not differ significantly in their technical performance in regard to moisture. Based on the VTT's improved mold model, the structure was not mold sensitive. The mold index did not reach the critical value of 1.0. Thus, the concrete sandwich element proved to be a safer structure than the lightweight façade system in terms of moisture performance and damage in high-rise climate conditions. The lightweight façade system proved to be a riskier alternative to high-rise climate conditions in these studied damage cases due to poor damage tolerance.

This thesis provides a broad theoretical basis for combined heat and moisture transfer in building physics. It presents the heat and moisture storage and transfer methods needed for nonlinear time-dependent simulations. The results may be used to support decision-making in future projects, and the simulation models created in this work may be used to research the heat and moisture performance of various structures and types of damage.

Keywords: building physics, heat and moisture transfer, façade, high-rise, COMSOL Multiphysics

ALKUSANAT

Työn päätarkoituksena on saada selville kumpi kahdesta eri julkisivurakenteesta on lämpö- ja kosteusteknisesti varmempi vaihtoehto korkean rakentamisen olosuhteisiin. Työ on tehty vuoden 2020 aikana Sitowise Oy:n rakennetekniikka Uusimaa yksikköön. Työnohjaajina Sitowisella toimii DI Hemmo Sumkin ja DI Urpo Karesniemi. Työnohjaajina ja -valvojina toimii Oulun yliopistolla TkL Matti Kangaspuoskari ja DI Hannu Liedes. COMSOL-yhteistyöhenkilönä toimii Filip Fedorik Oulun yliopistolta.

Haluan erityisesti kiittää Sitowisen ohjaajia Hemmo Sumkinia ja Urpo Karesniemeä loistavasta työnohjauksesta sekä erinomaisesta aiheen keksimisestä. Lisäksi haluan kiittää yliopistolta työnohjaajia ja -valvojia Matti Kangaspuoskaria ja Hannu Liedestä kannustavasta ja loistavasta työnohjauksesta. Haluan myös kiittää yliopiston Filip Fedorikia ja Jouko Lumijärveä sekä kaikkia muita työhön osallistuneita henkilöitä neuvoista ja ohjeista COMSOL-simulaatioon sekä rakennusfysiikkaan liittyen.

Oulu, 29.9.2020



Santeri Schroderus

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

| | |
|---|-----|
| 1 Johdanto | 12 |
| 2 Korkea rakentaminen | 14 |
| 3 Yleistä rakennusfysiikasta..... | 20 |
| 3.1 Lämpö | 21 |
| 3.2 Kosteus..... | 25 |
| 3.3 Rakenteiden ilmatiiviys..... | 40 |
| 4 Lämpö ja kosteus rakenteissa..... | 47 |
| 4.1 Lämmön varastoituminen..... | 47 |
| 4.2 Kosteuden varastoituminen..... | 50 |
| 4.3 Lämmön siirtyminen | 58 |
| 4.4 Kosteuden siirtyminen | 74 |
| 4.5 Yhdistetty lämmön ja kosteuden siirtyminen..... | 95 |
| 5 Simulointimallit | 102 |
| 5.1 Mallinnettavat julkisivurakenteet..... | 102 |
| 5.1.1 Teräsbetonisandwich-elementti | 102 |
| 5.1.2 Kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu | 103 |
| 5.2 Simulointimallien yhteiset määrittelyt | 105 |
| 5.2.1 COMSOL Multiphysics -simulointiohjelma | 105 |
| 5.2.2 Materiaaliominaisuudet | 106 |
| 5.2.3 Valitut ulko- ja sisäilman olosuhteet | 107 |
| 5.2.4 Reunaehdot ja rajoitukset | 108 |
| 5.2.5 Simuloinneissa käytettävät lämmön ja kosteuden siirtymistavat | 109 |
| 5.3 Betonisandwich-elementin simulointi..... | 110 |
| 5.4 Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun simulointi | 112 |
| 5.5 Betonisandwich-elementin tulokset | 115 |
| 5.6 Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun tulokset..... | 122 |
| 6 Tulosten tarkastelu | 131 |
| 6.1 Betonisandwich-elementti..... | 131 |
| 6.2 Kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu..... | 135 |

| | |
|---|-----|
| 6.3 Rakenteiden vertailu..... | 140 |
| 6.4 Herkkyystarkastelu..... | 142 |
| 7 Johtopäätökset ja suositukset | 145 |
| 8 Yhteenveto | 150 |
| LÄHDELUETTELO | 158 |
| LIITTEET | |
| Liite 1. Materiaaliominaisuudet. | |
| Liite 2. Sisäilman suhteellisen kosteuden laskenta. | |
| Liite 3. Viistosateen laskenta. | |

MERKINNÄT JA LYHENTEET

| | |
|-------------|--|
| ∇ | gradientti (differentiaalioperaattori) |
| ∂ | osittaisderivaatan symboli |
| A | pinta-ala [m^2] |
| C_p | ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$] |
| $c_{v,sat}$ | vesihöyryn kyllästyskonsentraatio [mol/m^3] |
| D_w | kapillaarikerroin [m^2/s] |
| D_ϕ | vedenjohtumiskerroin [kg/ms] |
| d | paksuus [m] |
| G | kosteudentuotto [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$] |
| g | yhdistetty kosteusvirrantiheys [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] |
| g_l | veden kapillaarivuo [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] |
| g_o | konvektiivinen kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] |
| g_v | vesihöyryn diffuusiokosteusvuo [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] |
| g_k | konvektion kosteusvirta [kg/s] |
| H | kokonaisentalpia [J/m^3] |
| h | konvektion lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] |
| h_v | faasimuutoksen latentti lämpö [J/kg] |
| K | korjauskerroin [-] |
| K_a | ilmanläpäisykerroin [$\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sPa})$] |
| K_j | pistemäisten kylmäsiltojen aiheuttama lisäkonduktanssi [W/K] |
| K_v | materiaalin vedenläpäisevyys [s] |
| k_a | ilmanläpäisevyys [$\text{m}^3/(\text{msPa})$] |
| L_v | veden höyrystymislämpö [J/kg] |
| l_k | viivamaisten kylmäsiltojen yhteispituus [m] |
| M | homeindeksi [-] |
| M_v | vesihöyryn moolimassa [kg/mol] |
| m | massa [kg] |
| m_d | kappaleen massa kuivana [kg] |
| m_w | kappaleeseen sitoutuneen kosteuden massa [kg] |
| n_{50} | ilmavuotoluku [$1/\text{h}$] |

| | |
|-----------------------|--|
| n_j | pistemäisten kylmäsiltojen lukumäärä rakennusosassa [-] |
| p_{sat} | kyllästymispaine [Pa] |
| p_c | kapillaaripaine [Pa] |
| p_v | vesihöyryn osapaine [Pa] |
| $p_{v.sat}$ | vesihöyryn kyllästysosapaine tietyssä lämpötilassa [Pa] |
| $p_{v.ext}$ | ympäröivän vesihöyryn osapaine [Pa] |
| p_∞ | ilmanpaine [Pa] |
| Q | lämpöenergia [J] |
| Q_v | lämpövirta [W] |
| Q_t | lämmöntuotto [W/m ³] |
| \dot{Q} | reiän läpi kulkeva tilavuusvirta [m ³ /s] |
| q | lämpövirran tiheys [W/m ²] |
| q | yhdistetty lämpövirran tiheys [W/m ²] |
| q_s | säteilemällä siirtyvä lämpövirta [W/m ²] |
| q_0 | konvektiivinen lämpövirran tiheys [W/m ²] |
| q_{s0} | ilmavuotoluku [m ³ /hm ²] |
| q_{flow} | väliaineen mukana siirtyvä lämpöenergia [W/m ³] |
| R | lämpövastus [m ² K/W] |
| R_{se} | ulkopinnan pintavastus [m ² K/W] |
| R_{si} | sisäpinnan pintavastus [m ² K/W] |
| S_h | lämmönlähde tai -viejä tiivistymisessä tai haihtumisessa [J/m ³ s] |
| T | lämpötila [K] |
| TI | lämpötilaindeksi [-] |
| TTY | Tampereen teknillinen yliopisto [-] |
| t | aika [s] |
| U | lämmönläpäisykerroin [W/m ² K] |
| u | kosteuspitoisuus [kg/kg] |
| V | tilavuus [m ³] |
| V_d | kappaleen tilavuus kuivana [m ³] |
| VTT | Valtion tieteellinen tutkimuskeskus [-] |
| v | nopeus [m/s] |
| W_p | vesihöyrynläpäisykerroin vesihöyryn osapaine-eron avulla [kg/m ² sPa] |
| W_v | vesihöyrynläpäisevyyskerroin vesihöyrypitoisuuseron avulla [m/s] |
| w | kosteuspitoisuus [kg/m ³] |

| | |
|-------------------|--|
| X | pistemäinen lisäkonduktanssi [W/K] |
| Y | viivamainen lisäkonduktanssi [W/m ² K] |
| Z_p | vesihöyryvastus vesihöyryn osapaine-eron avulla [m ² sPa/kg] |
| Z_v | vesihöyryvastus vesihöyrypitoisuuseron avulla [s/m] |
| ΔU_f | pistemäisten kylmäsiltojen aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys [W/m ² K] |
| ΔU_ψ | viivamaisten kylmäsiltojen aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys [W/m ² K] |
| ϕ | suhteellinen kosteus [%] |
| ψ_k | viivamaisten kylmäsiltojen aiheuttama lisäkonduktanssi [W/mK] |
| α | (yhdistetty) lämmönsiirtokerroin [W/m ² K] |
| α_s | säteilyn lämmönsiirtokerroin [W/m ² K] |
| β_p | kosteudensiirtymiskerroin [kg/m ² sPa] |
| δ_p | vesihöyrynläpäisevyys (diffuusiokerroin osapaineen avulla) [kg/msPa] |
| $\delta_{p,ilma}$ | ilman vesihöyrynläpäisevyys [kg/msPa] |
| δ_v | vesihöyrynläpäisevyys (diffuusiokerroin vesihöyrypitoisuuserolla) [m ² /s] |
| ε | emissiivisyys [-] |
| λ | lämmönjohtavuus [W/(mK)] |
| λ_u | lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo [W/(mK)] |
| μ | vesihöyryn diffuusiovastuskerroin [-] |
| ξ | kosteuskapasiteetti [kg/m ³] |
| ρ | tiheys [kg/m ³] |
| σ | Stefan-Boltzmanin vakio [W/m ² K ⁴] |
| φ | absoluuttinen kosteus [kg/m ³] tai [kg/kg] |

1 JOHDANTO

Korkean rakentamisen osuus uudisrakentamisesta on lisääntymässä kaupungistumisen, kestävän kehityksen ja vähäpäästöisen elintavan myötä. Suomessa korkea rakentaminen on suhteellisen uutta ja täten siihen liittyy vielä paljon epävarmuutta, niin suunnittelun kuin itse rakentamisen osalta. Korkean rakentamisen haastavuutta Suomessa lisää vaihtelevat vuodenaajat, jotka luovat haastavat ilmasto-olosuhteet rakenteiden lämpö- ja kosteustekniselle käyttäytymiselle. Täten odottamattoman epävarmuuden minimoimiseksi yrityksillä ilmenee tarpeita selvittää korkeaan rakentamiseen ja rakennusfysiikkaan liittyviä ongelmia. Projekteissa ilmenee enemmässä määrin vaatimuksia selvittää rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen ja ilmapitävyyteen liittyviä ongelmia. Yritykset ovat myös halukkaita löytämään optimaaliset ratkaisut teknisestä, taloudellisesta sekä ekologisesta näkökulmasta, minkä avulla ne voisivat saada varmuutta rakenteen toimivuudella ja säilyvyydelle. Julkisivujen rakennusfysikaalisesta käyttäytymisestä ei ole tehty viime aikoina tutkimuksia, joten uusi tutkimus on tarpeen. Rakennusten energiatehokkuuden ja kosteusteknisen toimivuuden kehittäminen on lisäksi ollut voimakkaassa nosteessa viime aikoina. Rakennusfysiikkaan liittyvät kosteusongelmat ovat olleet viime aikoina esillä, niin korkean kuin matalan rakentamisen rakennushankkeissa. Julkisivurakenteiden huolellinen suunnittelu on edellytyksenä koko rakennuksen oikeanlaiselle rakennusfysikaaliselle toiminnalle ja säilyvyydelle, jotta valitettavilta taloudellisilta kustannuksilta sekä korjaamisesta koituvista haitoista välttyttäisiin.

Tässä työssä vertaillaan kahta tyypillistä julkisivurakennetta rakennusfysikaaliselta kannalta korkean rakentamisen olosuhteissa Suomen tulevaisuuden ilmastossa. Korkeiden rakennusten ylimmissä kerroksissa vallitsee vaativammat rakennusfysikaaliset kuormitukset kuin alemmissä kerroksissa, johtuen suuremmista tuulenpaineista, viistosateesta sekä voimakkaammista ilmanvirtauksista. Nämä kuormitukset asettavat detaljien ja liitoksien tiiveydelle tiukempia vaatimuksia suunnittelussa. Tavoitteena on selvittää kumpi julkisivuratkaisu kahdesta vaihtoehdosta olisi lämpö- ja kosteustekniseltä toiminnaltaan luotettavin valinta ja millaisia perusteita

valinnan tekoon tulisi huomioida. Työssä painotutaan julkisivurakenteen lämpötekniiseen toimintaan, rakenteiden kuivumiseen ja kosteusteknisen toiminnan varmistamiseen.

Työssä suoritetaan kirjallisuustutkimus sekä luodaan laskentamallit, jotka lasketaan COMSOL Multiphysics -simulointiohjelmalla. Kirjallisuustutkimuksen avulla koottua teoriapohjaa käytetään hyväksi laskentamallin luomisessa sekä laskentamallista saatujen tuloksien verifioimisessa ja validoinnissa. Mahdollisia puutteita ja elementtimenetelmään liittyviä ongelmia analysoidaan ja niille pyritään löytämään mahdollisimman tarkat ratkaisut. COMSOLilla laaditaan laskentamallit julkisivurakenteiden liitoksista ja niiden todenmukaisista vauriotapauksista lämpö- ja kosteusvirtojen tutkimiseksi ja mahdollisten riskikohtien tunnistamiseksi. Molemmista julkisivurakennetyypeistä tehdään omat ajasta riippuvat laskentamallit, joissa vertaillaan lämpö- ja kosteusvirtoja rakennetyyppien välillä ja pyritään löytämään mahdolliset ongelmakohdat rakenteissa ja niiden liitoksissa. Tuloksien oikeellisuuden varmistamiseksi simulointeja voidaan suorittaa muillakin mallinnusohjelmilla vertailutuloksien saamiseksi.

Työssä vertaillaan kahta julkisivurakennetyyppiä niiden teknisten ominaisuuksien välillä siten, että painotutaan niiden rakennusfysikaaliseen toimivuuteen korkean rakentamisen olosuhteissa. Vertailtavat seinätyypit ovat teräsbetonisandwich-elementti ja kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu, joka valitaan toteutettavan kohteen vaatimuksien mukaan. Muita julkisivurakennetyyppejä työssä ei käsitellä. Työssä käsitellään molempien julkisivuratkaisujen lämpö- ja kosteusteknisiä hyötyjä ja mahdollisia rajoitteita ajatellen erityisesti sellaisia olosuhteita, joita julkisivuun kohdistuu korkean rakentamisen kohteissa. Ikkuna- ja ovidetaljien ongelmia ei analysoida laskennallisesti. Pitkäikäisyyteen ja elementtien saumojen huollettavuuteen otetaan kantaa, mutta niitä ei analysoida tarkemmin. Julkisivujen odotetaan toimivan lämpö- ja kosteusteknisesti standardien ja määräyksien mukaisesti.

2 KORKEA RAKENTAMINEN

Korkeita rakennuksia on maailmalla rakennettu jo vuosikymmenien ajan. Korkeiden rakennuksien rakentaminen alkoi 1800-luvun lopulla Chicagossa. Korkeampien rakennuksien rakentamisen mahdollisti uusien keksintöjen, kuten turvajärjestelmällä valmistettujen hissien ja puhelimien tulo markkinoille, jotka mahdollistivat rakennusmateriaalien kuljettamisen tehokkaasti ja hallitusti ylempiin kerroksiin (Hallebrand & Jakobsson 2016, s. 3). Uudet kevyemmät rakenneratkaisut teräksestä mahdollistivat myös korkeampien rakennusten rakentamisen. Vasta 2000-luvun alussa Suomessa on alettu rakentamaan korkeita rakennuksia vastaamaan yhteiskunnan tarpeita. Suomessa korkea rakentaminen on suhteellisen uutta johtuen harvasta väestötiheydestä ja suurista etäisyyksistä kaupunkien välillä. Voimakas kaupungistuminen sekä muuttovoitto isompiin kaupunkeihin Suomessa on aiheuttanut isompien kaupunkien keskustoissa neliöhintojen nousua. Neliöhintojen nousu, maankäytön tehostaminen sekä taloudellisen toiminnan tuottavuuden parantaminen suurilla kerrosvolyyymeilla on ajanut kehitystä siihen suuntaan, jossa on alettu rakentamaan korkeampia rakennuksia kuin aikaisemmin. Korkeat rakennukset eivät pelkästään lisää kerrosvolyymeja tontin alueella, vaan ne luovat maamerkkejä kaupungeille ja yrityksille. Korkeiden rakennusten avulla eri toimijat voivat markkinoida itseään maamerkkirakentamisen avulla kasvattaen toimijoiden imagoa ja tunnettavuutta. Suurkaupunkien keskustat ovat lisäksi kaikista tuottavimpia alueita kyseisissä maissa kaupunkitalouden perusteella (Korkean rakentamisen työryhmä 2011, s. 6). Korkea rakentaminen on lisäksi erinomainen keino tiivistää kaupunkirakennetta. Tutkitusti korkeiden rakennusten rakentaminen kasvattaa kyseisten alueiden asukasmääriä.

Puhuttaessa korkeasta rakentamisesta on tärkeä tuntea, miten korkea rakentaminen määritellään. Korkeaan rakentamiseen löytyy kirjallisuudesta muutamia määritelmiä. Korkealla rakentamisella tarkoitetaan kaupunkiasemassa alueen siluettiin tai keskeisillä paikoilla vallitseviin näkyymiin selkeästi muusta ympäristöstä erottuvaa korkeampaa ja kauas näkyvää kohdetta (Korkean rakentamisen työryhmä 2011, s. 5). Korkea rakennus määritellään kansainvälisen Emporis-sivuston mukaan rakennukseksi, jonka korkeus on

joko välillä 35-100 metriä tai rakennuksessa on 12-39 kerrosta riippumatta rakennuksen korkeudesta (Emporis 2020).

Suomessa korkeaksi rakentamiseksi luokitellaan yleensä yli 16-kerroksiset rakennukset. Korkeat rakennukset voidaan jakaa toiminnallisesti neljään ryhmään: asuin-, toimisto-, hotelli- ja hybridirakennukset. Hybridirakennuksessa rakennukseen on yhdistetty useampia erilaisia tilatyyppejä ja toimintoja, joten kerroksia on useasti vieläkin enemmän. Maailman mittakaavassa Suomessa toteutetut korkeat rakennukset ovat vielä keskikorkuisia tornitaloja, mutta niistä voidaan matalasta rakennuskannastaan tunnetussa Suomessa jo puhua korkeasta rakentamisesta. (Valjus 2019, s. 70.)

Korkeassa rakentamisessa rakennusten korkeus ja ylöspäin mentäessä kasvava tuulenpaine aiheuttavat haasteita julkisivujen tiiviydelle. Korkeiden rakennusten julkisivuihin kohdistuu haastavia rakennusfysikaalisia ilmiöitä johtuen suurista tuulenpaineista ja -virtauksista sekä muuttuvista ilmasto-olosuhteista. Korkeiden rakennuksien ympärillä matala rakennuskanta ei pienennä julkisivuun kohdistuvia rasituksia, esimerkiksi viistosade kastelee koko julkisivun sekä voimakas tuuli aiheuttaa julkisivuun suurempaa kuormitusta. Myrskyisellä säällä tuuli kuljettaa vettä vaakatasossa rakennuksen julkisivuun, jolloin vesi virtaa julkisivua pitkin pahimmillaan jopa ylöspäin ilmavirtauksen mukana, jolloin suunnittelussa pitää erityisesti kiinnittää huomioida vastapellityksien ja rakenteiden liittymien detaljeihin. Tuulen veteen aiheuttama paine kasvattaa julkisivulle kohdistuvaa vedenpainetta, joka taas asettaa vaatimuksia julkisivurakenteen saumojen tiiviydelle ja ulkopinnan materiaalivalinnoille. Julkisivujen pitää lisäksi olla kevyitä, asennusaikana helposti käsiteltävissä ja asennettavissa. Asennustyön aikana teknisen onnistumiseen pitää kiinnittää huomiota. Julkisivujen pitää olla käyttöältään kyseisissä rasitusluokissa pitkäikäisiä, ja lisäksi huollettavuuteen pitää kiinnittää jo suunnittelun alkuvaiheissa erityistä huomiota. (Valjus 2019, s. 76.)

Vesisaderasitus voi muodostua poikkeuksellisen voimakkaaksi myös silloin, kun ympäröivät rakenteet muodostavat rakennuksen ympärille tuulenvaikutusta voimistavia virtausreittejä. Mitoitavissa tuuli- ja myrskyolosuhteissa sadevesi voi tunkeutua julkisivurakenteeseen viallisten materiaalien ja rakenteiden saumojen, -rakennusosien liitosten tai -tuuletusrakojen kautta. (RIL 255-1 2014, s. 40.)

Rakennusten suunnittelun lähtökohtana on Maankäyttö- ja rakennuslaki. Maankäyttö- ja rakennuslain keskeisenä tavoitteena on toteuttaa rakentaminen ja alueiden käyttö niin, että pystytään luomaan hyvät lähtökohdat viihtyisälle elinympäristölle ja kestäväälle kehitykselle. Rakennusten kuormituksia käsittelevät asetukset ovat määriteltynä Suomen rakentamismääräyskokoelmassa. Rakennuksien suunnitteluprosessin alussa tärkeänä tekijänä on oikein määritellyt kuormitukset, joiden avulla rakennukset suunnitellaan ja mitoitetaan. Suomen rakentamismääräyskokoelmassa kantavien rakenteiden suunnitteluperusteissa asetetaan määräyksiä rakenteiden lujuudelle ja vakaudelle. Seuraamusten vakavuuteen ja suunnittelutehtävän vaativuuteen vaikuttavat muun muassa rakennuksen koko, rakennuspaikka, käyttötarkoitus ja rakenteiden mittasuhteet. Seuraamusten katsotaan olevan vakavia kantavien rakenteiden osalta, kun rakennuksessa on suuri joukko ihmisiä, kuten yli 8-kerroksiset rakennukset. Rakennukset jaetaan seuraamusluokkiin CC1, CC2 ja CC3 mahdollisista vaurioista aiheutuvien seurausten perusteella. Seuraamusluokkaan CC3 kuuluvat rakennukset ja rakenteet, joilla voi olla vakavia seuraamuksia ihmishenkien, taloudellisten-, sosiaalisten- ja ympäristövahinkojen takia. Yli 8-kerroksiset rakennukset kuuluvat seuraamusluokkaan CC3. CC2 kuuluvat keskisuurten seuraamusten omaavat rakenteet ja CC1 kuuluvat vähäiset seuraamukset omaavat rakenteet ja rakennukset. (RakMK 2016.)

Korkeiden rakennusten suunnittelu vaatii erityisosaamista erityisesti tuulen aiheuttamien ongelmien ratkaisemiseksi. Tuulikuormien suunnittelun osuus kasvaa merkittävästi siirryttäessä matalista rakennuksista korkeisiin rakennuksiin, kun tuulikuormituksen suuruus ja sen aiheuttamien ilmiöiden osuus kasvaa rakennuksen korkeuden kasvaessa (Granroth 2019, s. 10 & s. 72). Tuulikuormien määrittelyyn on olemassa kolme eri menetelmää: yksinkertainen laskentamalli, analyttinen laskentamalli sekä tuulitunnelikoe. Tuulitunnelikokeella selvitetään tuulennopeuksia halutuissa kohdissa sekä pyörteiden syntymistä rakennusten ulkopinnoilla (Granroth 2019, s. 26). Korkeiden rakennuksien mitoituksessa tuulikuormien määrittelyyn käytetään lähes aina tuulitunnelikokeita, joita pidetään varmimpina tapoina määrittää tuulikuormituksen laskennassa käytettävät parametrit. Rakennesuunnittelija esittää tuulitunnelikokeiden tarpeellisuuden kohdekohtaisesti käyttäen valintaperusteissa rakennuksen muodon, rakennuksen dynaamisten ominaisuuksien sekä viereisten rakennuksien vaikutusta (Helsingin kaupunki 2018, s. 44). Tuulitunnelikokeilla pystytään määrittämään

rakennuksen vaste ja täten paikalliset vaakasuuntaiset kiihtyvyydet, joita käytetään käyttörajatilan mitoituksessa. Tuulitunnelikokeilla saadaan myös murtorajatilan mukaiset tarvittavat voimasuureet luotettavasti varsinkin, jos rakennuksessa on muuttuvia poikkileikkauksia ja epäsäännöllisiä muotoja (Valjus 2019, s. 73).

Julkisivujen tiiveyttä on testattu esimerkiksi Helsingin Kalasataman torneissa täysimittakaavaisilla ilman- ja vedenpitävyyskokeilla. Näillä kokeilla pyritään varmistumaan julkisivujen rakennusfysikaalisesta toimivuudesta. (Valjus 2019, s. 76.)

Tuulenpaineen aiheuttama kokonaisvaikutus ja tuulen aiheuttamat kuormitushuiput pitää erityisesti huomioida rakenteiden ja liitosten mitoituksessa sekä mallintaa tuulitunnelikokein. Julkisivujen suunnittelussa pitää erityisesti huomioida lasijulkisivun paikalliset painekuormat lasipaksuuksien, julkisivujen kiinnikkeiden ja ripustuksien määrittämiseksi. Lisäksi saumojen vedenpitävyys pitää varmistaa standardoidusti määräystenmukaiseksi. (Kiviluoma 2007, s. 1.)

Julkisivun tavanomaisesta poikkeava muoto, esimerkiksi ulokkeet, kaarevat pinnat ja terävät kulmat voivat aiheuttaa suuria paikallisia paine- ja imukuormia. Tuulen aiheuttamat rakennusrungon liialliset värähtelyt voivat johtaa julkisivun saumojen vuotamiseen sateella. (Kiviluoma 2007, s. 2.)

Helsingin korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen ohjekortit 2018 on laadittu kiteyttämään korkeassa rakentamisessa vaadittavia lisäselvityksiä ja helpottamaan hankkeiden aikataulun suunnittelua. Korteissa on esitetty korkeaan rakentamiseen liittyviä tärkeitä ja tavanomaisesta poikkeavia asiakohtia. Korkeassa rakentamisessa pitää luonnollisesti myös aina noudattaa kaikkia tavanomaiseen rakentamiseen liittyviä säädöksiä, määräyksiä ja standardeja. Ohjekortit on jaettu viiteen eri osa-alueeseen: yleiset-, rakenne-, LVI-, akustiikka- ja paloasiakortit. Kaikkia ohjekortteja tulee noudattaa, jos rakennus on yli 16 kerrosta korkea. Palotekniikkaan liittyviä ohjekortteja tulee aina noudattaa, kun rakennuksen korkeus on yli 56 m. Rakennekorteissa RAK on esitetty rakenne-, pohjarakenne- ja rakennusfysikaalisen suunnittelun ja rakentamisen lisävaatimuksia korkeaan rakentamiseen liittyen. (Helsingin kaupunki 2018, s. 3-5.)

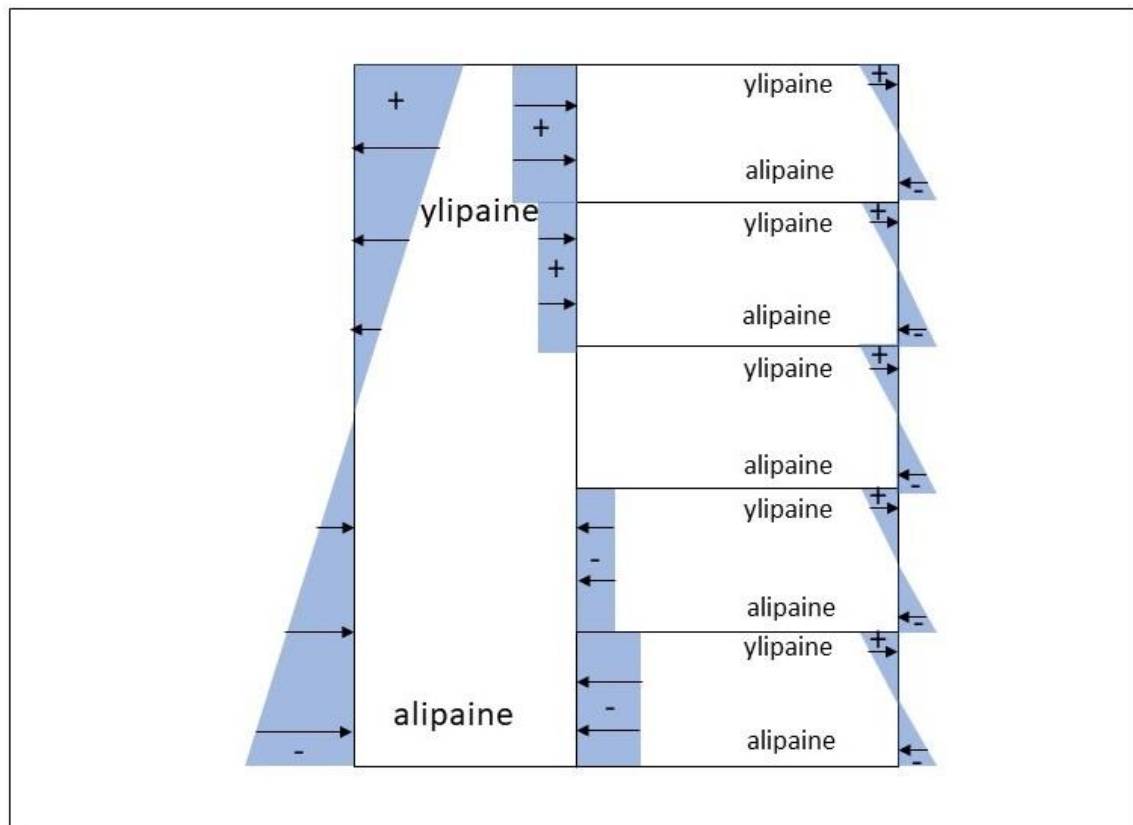
Korkeiden rakennusten kohteissa vastaavan rakennesuunnittelijan, vastaavan rakennusfysikaalisen suunnittelijan ja ulkopuolisen tarkastajan on täytettävä poikkeuksellisen vaativan suunnittelutehtävän kelpoisuusvaatimukset rakennetekniikan osalta. Suunnittelutehtävän vaativuus asettaa ehtoja koulutuksen ja työkokemuksen osalta. (Ympäristöministeriö 2016, s. 1.)

Korkeassa rakentamisessa vaadittavia lisäselvityksiä julkisivurakenteiden suunnittelun osalta ovat tuuliselvitys, joka usein toteutetaan tuulitunnelikokeiden avulla, jotta saadaan määritettyä kuormitukset julkisivurakenteille. Julkisivurakenteiden vedenpoisjohtaminen ja vedenpitävyys täytyy tarvittaessa tutkia kokeellisesti. Julkisivurakenteille ja kiinnityksille täytyy suorittaa staattiset sekä dynaamiset lujuusanalyysit ja ne pitää tarkastuttaa ulkopuolisella tarkastajalla. Ulkopuolinen tarkastaja myös varmistaa lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan vaipparakenteiden vesi-, ilma- ja vesihöyryn tiiveyden osalta. (Helsingin kaupunki 2018, s. 52 & s. 54.)

Korkeassa rakentamisessa kosteudenhallinta sisällytetään suunnittelun ja toteutuksen laadunvarmistukseen sekä riskienhallintaan. Kosteudenhallinnassa on huomioitava erityisesti rakennuksen ulkovaipan rakennusaikaiset säärasitukset jo suunnitteluvaiheessa. Kosteudenhallinnassa voidaan käyttää Kuivaketju10-toimintaketjua, jossa määritellään hankekohtaisesti korkeaan rakentamiseen liittyvät erityisriskit ja riskienhallinta. (Helsingin kaupunki 2018, s. 56.)

Hormivaikutus on tavallista voimakkaampi korkeissa rakennuksissa ja se pitää huomioida suunnittelussa. Hormivaikutus tarkoittaa sisä- ja ulkolämpötilaeron sekä korkeuseron yhteisvaikutuksen aikaansaamaa termistä paine-eroa rakennuksen vaipan läpi. Rakennuksen sisällä lämmin ilma alkaa virrata ylöspäin, koska lämpimän ilman tiheys on pienempi kuin kylmemmän ilman, ja täten kevyempänä pyrkii nousemaan ylöspäin. Rakennuksen alakerrokseen syntyy täten alipaine, kun lämmin ilma kohoaa ylöspäin muodostaen rakennuksen yläosaan ylipaineen, kuten Kuvasta 1 nähdään. Syntyvät paine-erot aiheuttavat ilman virtaamista ulkovaipan läpi. Yläosassa ilma virtaa sisäpuolelta ulkopuolelle paine-erojen vaikutuksessa, kun taas alakerroksissa ilma virtaa ulkopuolelta sisäpuolelle. Kylmä ilmasto kasvattaa paine-eroja ja täten erityisesti Suomessa hormivaikutus pitää ottaa huomioon suunnittelussa. Paine-erojen vaikutuksesta

julkisivurakenteiden ja niiden saumojen läpi ilman virtaus kasvaa ja rakennuksen sisälle muodostuu vaaka- ja pystysuuntaisia ilmavirtauksia. Tavanomaisesta poikkeava ilman virtaus rakenteiden läpi lisää kosteusvauroiden mahdollisuutta sekä epäpuhtauksien kulkeutumista ilmavirtauksien mukana rakenteiden sisältä sisäilmaan. Hormivaikutuksesta tehdään laskentamalli, jossa koko rakennuksen paine-eroja ja vuotoilmavirtoja simuloidaan. Rakenteiden liitosten ja saumojen tiiveys on avainasemassa rakenteiden turmeltumisen estämiseksi. Rakennuksen kokonaispainesuhteet muodostuvat hormivaikutuksen, ilmanvaihdon ja tuulen superpositioista. Ilmanvaihto ja tuulenpaine voivat joko vahvistaa tai heikentää hormivaikutusta. (Helsingin kaupunki 2018, s. 68; Rantala & Leivo 2007, s. 1-2.)



Kuva 1. Hormivaikutus. Sisä- ja ulkoilman lämpötilaerot aiheuttavat painejakauman rakennuksen seinien läpi. Seinät on oletettu ilmatiiviiksi.

3 YLEISTÄ RAKENNUSFYSIIKASTA

Rakennusfysiikassa perinteisesti tutkitaan rakennusten ja rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Rakennusfysiikkaan lasketaan myös kuuluvaksi ilmatiiviyteen, akustiikkaan ja valaistukseen liittyviä ongelmia. Rakennusfysiikan tärkeys on kasvanut jatkuvasti, koska merkittävä osa havaituista vaurioista ja ongelmista rakenteissa liittyy rakennuksen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Lisäksi rakennusten energiatehokkuutta ilmatiiviyden ja materiaalien lämmönjohtavuuden osalta halutaan parantaa. Rakennusfysikaalisen suunnittelun osalta osa-alueet voidaan jakaa kolmeen alueeseen: lämpö, kosteus ja ilma. Rakennuksen lämpötekniikan suunnittelun avulla pyritään pienentämään rakennuksen energiakulutusta eli estämään lämmön siirtyminen konvektiolla, konduktiolla ja säteilyllä rakennuksen ulkopuolelle. Kosteusteknisellä suunnittelulla pyritään rajoittamaan vesihöyryn siirtymistä diffuusiolla sekä estämään kosteuden kulkeutuminen kapillaarisella veden virtauksella, kosteuden konvektiolla ja painovoimaisella veden siirtymisellä haitallisesti rakenteisiin sekä varmistetaan rakenteen riittävä kuivumiskyky. Näillä toimilla pyritään estämään rakenteen tai rakennuksen turmeltuminen ja vaurioituminen kosteuden tai veden osalta. Rakennusvaipan ilmapitävyyden suunnittelulla estetään haitallisten aineiden kulkeutuminen sisäilmaan rakenteiden sisältä riittävällä tiiveydellä ja oikeanlaisella paineistuksella sekä pyritään parantamaan sisäilman laatua ja viihtyvyyttä. Rakennusvaipan ilmatiiviydellä varmistetaan lisäksi rakennuksen oikeanlainen rakennusfysikaalinen toiminta paineistuksen ja kylmäsiltojen osalta. (Vinha 2009, s. 1.)

Vuosittain Suomessa todetaan lukuisia kosteusvaurioita, jotka ovat aiheutuneet veden sekä kosteuden kosketuksesta rakenteeseen ja pääsystä rakenteen sisään vaurioittaen kosteudelle herkkiä materiaaleja ja aiheuttaen ongelmia. Vesi ei pelkästään aiheuta aineellista vahinkoa vaan kosteus voi vaikuttaa myös alentavasti lämmöneristyskykyyn ja täten rakennuksen energiankulutukseen kasvattaen lämmityskustannuksia. Rakennustekniikassa ideana on pitää vesi poissa rakennusmateriaaleista tai ainakin pyrkiä estämään kosteuspitoisuuden kasvamista liian suureksi. Viistosade voi aiheuttaa kosteuden imeytymisen julkisivun ulkopinnasta rakenteeseen. Rakennuksen sisällä vallitseva sisäilman korkea suhteellinen kosteuspitoisuus voi aiheuttaa kosteuden

kondensoitumista rakenteisiin, varsinkin jos rakennuksen sisällä vallitsee ylipaine. Vesi voi kapillaarisesti liikkua huokoisien materiaalien kapillaarihuokoisissa täyttäen huokosrakenteen vedellä. Lisäksi rakenteen sisällä voi olla jäänyt rakennusaikaista kosteutta, joka diffusoituu korkeammasta kosteuspitoisuudesta matalampaan kosteuspitoisuuteen eli yleensä rakenteen sisältä rakenteesta ulos. Toimivien kosteusteknisten ratkaisujen suunnittelemiseksi täytyy ymmärtää kosteuden siirtyminen ja varastoituminen erilaisiin materiaaleihin sekä minkälaisissa olosuhteissa rakenteen kosteusvaurion syntyminen on mahdollista. Kosteus voi kulkeutua rakenteisiin kapillaarisesti vetenä, diffusoituen vesihöyryinä, painovoimaisesti tai ilmavirtauksien mukana.

3.1 Lämpö

Rakennusosat mitoitetaan rakenteiden lämmönläpäisykyvyn perusteella ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukaisesti. Rakennusosille on määritetty maksimiviite U-arvot eli lämmönläpäisykertoimet, jotka kyseiset rakennusosat tulisi alittaa. Rakennusosa voi myös joissakin tapauksissa ylittää maksimiviitearvonsa, mutta tämä otetaan huomioon koko rakennuksen kokonaislämpöhäviön laskennassa. Koko rakennuksen vaipan lämpimän tilan lämpöhäviön vertailuarvo lasketaan seinällä käyttämällä lämmönläpäisykertoimen arvoa $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ikkunoille ja oville lämmönläpäisykertoimen arvona käytetään yleisesti $U = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Rakennuksen vaipan lämpöhäviö lasketaan rakennusosien pinta-alojen ja lämmönläpäisykertoimien avulla. (Ympäristöministeriö 2017, s. 11.)

Rakennuksen kokonaislämpöhäviö lasketaan rakennuksen vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon summana. Rakennuksen lämpöhäviö ei voi ylittää vertailuarvojen avulla määritettyä vertailulämpöhäviötä. Rakennuksen kokonaislämpöhäviön laskentaa selostetaan 1010/2017 Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. (Ympäristöministeriö 2017, s. 11.)

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa annetaan määräyksiä rakennuksen vaipan osalta lämmöneristävyyden, ilmatiiviyyden ja vesihöyrynläpäisevyyden sekä kosteusteknisen toimivuuden suhteen. Rakennuksen vaipan lämmöneristyskyky riippuu

myös työteknisestä onnistumisesta ja kuinka tarkasti lämmöneristeet, höyrysulut ja tuulensuojalevyt on asennettu. Erilaiset ilmaraot ja -railot rakenteen sisällä, liitoksissa sekä saumakohdissa mahdollistavat rakenteen sisäisen konvektion ja huonontavat rakenteen lämmöneristyskykyä. Liitosten ja saumojen työtekeminen onnistuminen ilmapitävyyden osalta on tärkeää, koska ilma pääsee kulkemaan pienistäkin raoista ja halkeamista. (Vinha 2009, s. 4 & s. 6.)

Rakennuksen vaipan kaikkia kylmäsiltoja ei tarvitse ottaa huomioon U-arvon määrittämisessä. U-arvoa määritettäessä otetaan vain huomioon ne kylmäsiltoja, jotka ovat kyseiseen rakennusosaan oleellisesti kuuluvia komponentteja, kuten lämmöneristeen läpäisevät ansaat, tuki- ja runkorakenteet. Tällaiset kylmäsiltoja muodostuvat suunnittelukohteesta riippumatta ja ne ovat yleensä rakennusteknisesti välttämättömiä komponentteja. (Vinha 2009, s. 4.)

Jos lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot poikkeavat rakenteen leveydellä yli viisinkertaisesti, niin rakennusosassa olevat säännölliset kylmäsiltoja otetaan huomioon rakenteen lämmönläpäisykertoimen laskennassa erikseen piste ja viivamaisina kylmäsiltojen arvojen avulla. Piste ja viivamaisien kylmäsiltojen huomioon ottaminen käydään läpi seuraavaksi. (Vinha 2009, s. 18.)

Rakennusosien välisten liitosten esimerkiksi ulkoseinän ja välipohjan sekä ulkoseinien ja ikkunoiden liitoksien aiheuttamat kylmäsiltoja huomioidaan viivamaisella lisäkonduktanssilla Y [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]. Viivamainen lisäkonduktanssi ilmaisee rakennusosassa olevan pituusyksikön mittaisen viivamaisen kylmäsiltojen aiheuttaman lisäyksen rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero on yhden lämpötilayksikön suuruinen rakennusosan eri puolilla. (Vinha 2010, s. 27; Siikanen 2012, s. 7.)

Viivamaisen kylmäsiltojen aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys lasketaan kaavasta

$$\Delta U_{\psi} = \sum \psi_k \left(\frac{l_k}{A} \right), \quad (1a)$$

missä ΔU_ψ on viivamaisten säännöllisten kylmäsiltojen aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],
 ψ_k viivamaisten kylmäsiltojen k viivamainen lisäkonduktanssi [W/mK],
 l_k on viivamaisten kylmäsiltojen yhteispituus [m] ja
 A on rakennusosan pinta-ala [m^2].

Pistemäinen lisäkonduktanssi X [W/K] ilmoittaa pistemäisestä kylmäsiltaasta tulevan lisäyksen rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolien välillä on yhden lämpötilayksikön suuruinen (Siikanen 2012, s. 7). Pistemäisen kylmäsiltojen aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys lasketaan kaavasta

$$\Delta U_f = \sum K_j \left(\frac{n_j}{A} \right), \quad (1b)$$

missä ΔU_f on pistemäisten säännöllisten kylmäsiltojen aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],
 K_j on pistemäisten kylmäsiltojen aiheuttama pistemäinen lisäkonduktanssi [W/K],
 n_j on pistemäisten kylmäsiltojen määrä rakennusosassa ja
 A on rakennusosan pinta-ala [m^2].

Lämpökuvauksella tarkastellaan rakennusten sisäpintojen lämpötekniistä toimintaa, minkä tarkoituksena on selvittää vaipparakenteiden ilmavuoto- ja kylmäsilta-kohtia. Lämpökuvaukseen vaaditaan sisä- ja ulkolämpötilan välille riittävä lämpötilaero, kun tutkitaan rakennuksen kylmäsiltoja. Mitattujen sisälämpötilojen avulla rakenteille lasketaan niin sanottu lämpötilaindeksi. (Vinha 2014, s. 29.)

Rakennuksen vaipan lämpötekniistä toimivuutta voidaan arvioida lämpötilaindeksin avulla. Suurempi lämpötilaindeksi tarkoittaa suurempaa rakenteen sisäpinnan lämpötilaa. Tämä tarkoittaa vähemmän vajausta rakenteen lämmöneristyksessä sekä sitä, että rakenteessa on vähemmän kylmäsiltoja. Lämpötilaindeksi riippuu voimakkaasti sisäpinnan ja sisäilman lämpötilan erosta. Lämpötilaindeksi määritellään seuraavasti

$$TI = \frac{(T_{sp}-T_o)}{(T_i-T_o)} * 100 \%, \quad (2)$$

missä TI on lämpötilaindeksi,
 T_{sp} on sisäpinnan lämpötila °C,
 T_o on ulkoilman lämpötila °C ja
 T_i on sisäilman lämpötila °C.

Lämpötilaindeksille on annettu suositusarvoja, ja seinälle hyvää tasoa vastaava lämpötilaindeksi on yli 87 %. Asumisterveysohjeessa on annettu seinille, lattioille ja pistemäisille kohdille pintalämpötilojen minimi raja-arvoja, joiden alittaminen altistaa kosteusvaurion synnylle. Matalat pintalämpötilat johtuvat yleensä asennusaikaisista puutteista, esimerkiksi eristeiden ja höyrysulkujen puutteellisesta asennuksesta sekä saumojen ilmavuodoista. Lisäksi seinien lämmöneristyskyky voi heikentyä hetkellisesti, jos eristeet asennetaan märkinä rakenteen sisään, jolloin eristeiden lämmönjohtavuus kasvaa. Puutteellinen suunnittelu ja huono työtekeminen toteutus mahdollistaa kylmäsiltojen muodostumisen. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003, s. 13 & s. 16.)

Teräsbetonisandwich-elementtejä käytetään yleisesti Suomessa julkisivurakenteena ja lämpöä eristävänä rakenneosana. Sandwich-elementtien saumojen suunnittelussa huomioidaan rakennuksen ja erityisesti sen ulkovaipan deformaatiot, jotka aiheutuvat lämpötilan muutoksesta ja rakennuksen rungon liikkeistä. Saumoilla myös tasataan elementtien ja niiden asennuksesta syntyneet toleranssit. Saumauksen laatuun vaikuttavat työmaan olosuhteet, asentajan työkokemus, saumattavien pintojen laatu ja saumojen koko. (Rakentamisen kosteudenhallinta 2020; RIL 255-1 2014, s. 126.)

Kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivun lasien takana olevan rungon on kestävä lasirakenteilta rungolle siirtyvä tuulikuormitus. Monikerroksisissa rakennuksissa lasielementit yleensä suunnitellaan kerroksen korkuisiksi elementeiksi. Lasiseinäelementit ripustetaan yleensä välipohjista erilaisilla kannatinjärjestelmillä. Välipohjan taipuma ei saa aiheuttaa lasiseinään sellaisia muodonmuutoksia, jotka voisivat aiheuttaa lasiseinään haitallisia siirtymiä tai muodonmuutoksia. Rungon lämpöliikkeet, betonin ajasta riippuvat ominaisuudet ja alustan pitkäaikaistaipuma vaikuttavat vaakasuorien saumojen liikkumavaraan. (Pekkala & Vikman 2009, s. 5.)

Laatan ja seinäelementin välissä on oltava riittävä toleranssi lämpölaajenemisen ja rakennusrungon aiheuttavien liikkeiden osalta. Liittymien ilmatiiviys-, ääneneristävyys- ja palonkestovaatimukset pyritään täyttämään elastisilla saumamassoilla ja paisuvilla saumanauhoilla sekä mahdollisilla peitelistoilla. (Pekkala & Vikman 2009, s. 6.)

Lasirakenne on monessa teknisessä mielessä heikompi ratkaisu kuin tavallinen seinärakenne. Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo on lasijulkisivuissa jopa moninkertainen verrattuna tavalliseen rakenteeseen. Viihtyvyys lasirakenteen lähellä heikkenee vedon tunteen, auringon lämpösäteilyn ja häikäisyn johdosta. Lisäksi lasirakenteen pintaan ei saa kondensoitua vettä eli lämpötila lasin sisäpinnalla ei saa laskea sisäilman kastepisteeseen. (RIL 255-1 2014, s. 141 & 144.)

3.2 Kosteus

Alhainen rakenteen tai materiaalin pintalämpötila voi mahdollisesti aiheuttaa kosteuden kondensoitumista ja homeen tai mikrobien kasvua rakenteen sisäpintaan. Tämä johtuu siitä, että ilman suhteellinen kosteuspitoisuus sisäpinnan lähellä nousee, kun pintalämpötila laskee. Kastepisteen alittaminen aiheuttaa ilman kosteuden kondensoitumista rakenteiden pinnoille. Sisäilman sisältämän kosteuden tiivistyminen pistemäisestäkin rakenteen kylmään pintaan kasvattaa mahdollisuutta kosteusvaurion synnylle. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003, s. 13.)

Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä vedeksi, kun ilman suhteellinen kosteus saavuttaa 100 % eli ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut kyseisessä lämpötilassa kyllästymisvesihöyrypitoisuuden. Rakenteissa vesihöyry tiivistyy aina ympäröivää ilmaa kylmemmällä pinnalla, jos ilman vesihöyryn kastepiste ylittyy. Kosteus kondensoituu helpoiten tiiviiden materiaalien sekä jo valmiiksi märkien materiaalien pinoille (Pitkäranta 2016, s. 102).

Ilman kyky sitoa itseensä vesihöyryä riippuu ilman lämpötilasta. Lämpimämpi ilma pystyy sitomaan itseensä enemmän vesihöyryä kuin kylmempi ilma. Vesihöyryn kyllästysosapaineen laskemiseen on olemassa muutamia eri variaatioita. COMSOL

Multiphysics -ohjelma (COMSOL 2018, s. 262) käyttää vesihöyryn kyllästysosapaineen laskemiseen kaavaa

$$p_{v.sat}(T) = 610,7 [Pa] * 10^{7,5 * \frac{T-273,15 [K]}{T-35,85 [K]}}, \quad (3)$$

missä $p_{v.sat}(T)$ on vesihöyryn kyllästysosapaine tietyssä lämpötilassa [Pa] ja T on lämpötila [K].

Diffuusion haittavaikutusten estämiseksi rakenteet tulee tehdä sisäpuolelta riittävän vesihöyrytiiviksi ja siten, että rakenteen vesihöyryvastukset pienenevät sisältä ulospäin mentäessä. Rakenteen sisäpuolella käytetään yleensä diffuusiotiivistä kerrosta eli höyrysulkua. (Siikanen 2012, s. 12.)

Höyrysulun pääasiallinen tehtävä on estää sisäilman kosteuden diffuusio kohti rakennuksen ulkopuolta ja paksua mineraalivillakerrosta. Höyrysulkuna voi toimia mikä tahansa yhtenäinen ja tiivis rakennekerros, joka sijaitsee rakenteen lämpimällä puolella lähellä rakenteen sisäpintaa, jolla on riittävä vesihöyryvastus Z_v [s/m]. Höyrysulkuna voi esimerkiksi toimia kalvo tai levy. (RIL 255-1, 2014, s. 126.)

Suhteellinen kosteus määritellään vesihöyryn todellisen osapaineen ja kyllästyspaineen suhteena. Suhteellinen kosteus ilmaistaan prosentteina. Suhteellisen kosteuden arvo voi vaihdella välillä 0-100 %, jossa arvo 100 % tarkoittaa tilannetta, missä ilma on täysin vesihöyryn kyllästämää vakio lämpötilassa. Suhteellinen kosteus ilmaistaan

$$\phi = \frac{p_v}{p_{v.sat}(T)} * 100 \%, \quad (4)$$

missä ϕ on suhteellinen kosteus [%],
 p_v on vesihöyryn todellinen osapaine kaasuseoksessa [Pa] ja
 $p_{v.sat}(T)$ on vesihöyryn kyllästysosapaine tietyssä lämpötilassa [Pa].

Suhteellinen kosteus voidaan ilmaista myös ilman vesihöyrymäärän, absoluuttisen kosteuden $[g/m^3]$ avulla suhteessa tarkasteltavaa lämpötilaa vastaavaan ilman kyllästyskosteuteen $[g/m^3]$. Kyllästyskosteus tarkoittaa suurinta vesihöyrymäärää, jonka ilma tarkasteltavassa lämpötilassa pystyy sitomaan ilman, että kosteus ei tiivistyisi vedeksi pinnoille (Pitkäranta 2016, s. 102).

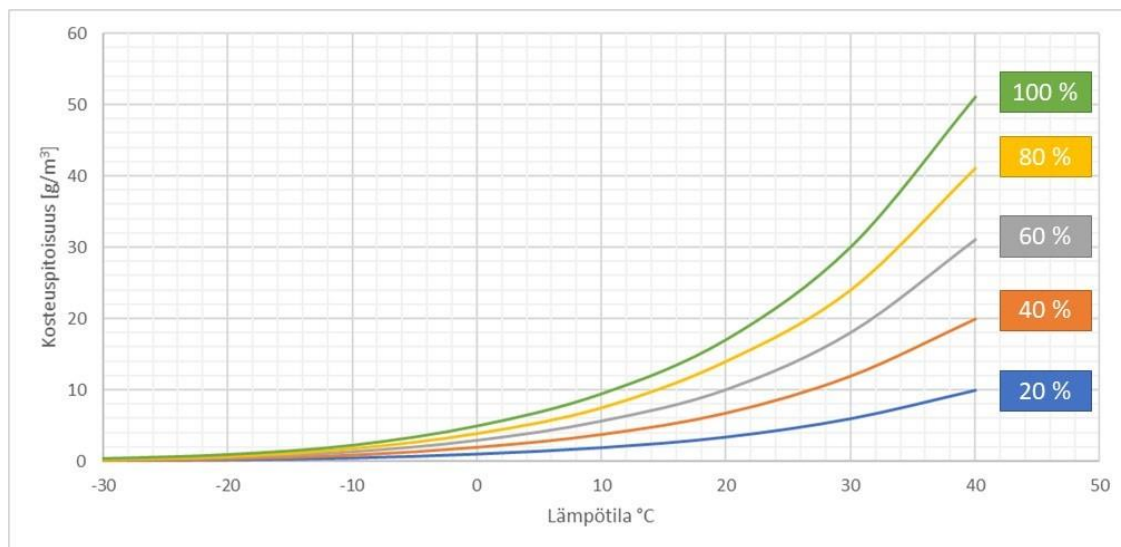
Esimerkiksi, jos ilmassa on vesihöyryä puolet kyllästyspitoisuudesta, niin suhteellisen kosteuden arvo on 50 %. Ilmassa olevan vesihöyryn määrä vaikuttaa ilman kanssa kosketuksissa olevien huokoisten hygroskooppisten rakennusmateriaalien kosteuspitoisuuksiin. Suhteellisen kosteuden arvo on riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta, koska lämpötila määrittää kuinka paljon ilma pystyy sisältämään vesihöyryä. (RIL 1984, s. 101.)

Absoluuttisen kosteuden määrä ilmassa voidaan ilmaista vesihöyryn osapaineen ja ilmanpaineen avulla seuraavasti

$$\varphi = \frac{0,62 \cdot p_v}{p_{\infty} - p_v}, \quad (5)$$

missä φ on absoluuttinen kosteus $[kg/kg]$,
 p_{∞} on ympäröivä ilmanpaine $[Pa]$ ja
 p_v on vesihöyryn osapaine $[Pa]$.

Ilman sisältämä kosteuspitoisuus $[g/m^3]$ voidaan esittää ilman suhteellisen kosteuden ja ilman lämpötilan $[^{\circ}C]$ avulla Kuvan 2 mukaisesti. Kuvasta 2 pystytään määrittämään kosteudenmäärä tilavuudessa $[g/m^3]$, kun ilman lämpötila ja suhteellinen kosteuspitoisuus tiedetään. Esimerkiksi $20^{\circ}C$ lämpötilassa ja 60 % suhteellisessa kosteudessa ilma sisältää kosteutta n. $10 [g/m^3]$.



Kuva 2. Ilman sisältämän vesihöyryn määrä riippuen vallitsevasta lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta (mukaillen Pitkäranta 2016, s. 103).

Kylläinen höyry on höyryä, joka on sen hetkisen paineen mukaisessa tiivistymislämpötilassaan. Mikäli höyry menettää lämpöä eli lämpötila laskee, niin se kondensoituu nesteeksi pinnoille. Kondensoitumisen eli tiivistymisfaasimuutoksen aikana aineen lämpötila pysyy vakiona.

Rakenteet on rakentamismääräysten mukaan suunniteltava ja rakennettava siten, että rakenteisiin ei kosteudesta aiheudu rakenteellisia, funktionaalisia tai visuaalisia vikoja koko rakenteen käytön aikana. Vaipparakenteissa kosteuden kondensoitumiselle ja homeen kasvulle suotuisia olosuhteita täytyy esiintyä mahdollisimman vähän ja vain hetkellisesti vuodenaikojen mukaan. Rakennuksissa erilaiset homeet usein kasvavat lämpötilan ollessa 0-50 °C välillä ja suhteellisen kosteuden ollessa yli 80 %. Lämpötilan ollessa 0 °C, suhteellisen kosteuden arvo ei saisi ylittää 80 %. Koska tällöin kyseisen suhteellisen kosteuden arvon ylitys altistaa kosteuden kondensoitumiselle kylmemmille pinnoille. Kosteuden kondensoituminen rakenteiden tai materiaalien pinnoille alkaa, kun ilman suhteellinen kosteuspitoisuus saavuttaa arvon 100 %. Tätä suhteellisen kosteuden pitoisuutta kutsutaan kyllästyskosteuspitoisuudeksi. (Vinha 2009, s. 6-7.)

Homeen kasvun ja kehittymisen tarkasteluun VTT ja TTY on kehittänyt yhteistyössä parannetun homemallin, jonka avulla pystytään arvioimaan homeen kasvua rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan

funktiona. Parannetussa homemallissa homehtumista kuvaavana suurena käytetään homeindeksiä M , joka vaihtelee 0-6 välillä. Korkeampi homeindeksin arvo viittaa homeen määrän kasvuun rakennusmateriaalin pinnalla. (RIL 255-1 2014, s. 60.)

Parannetussa homemallissa rakennusmateriaalit on luokiteltu neljään homehtumisherkkyydsluokkaan HH1-HH4, niiden homehtumisherkkyyden perusteella. Tässä työssä vertailtavien julkisivurakenteiden materiaalit kuuluvat kaikki HH3:een tai HH4:een, joissa homeen kasvunopeus ei ole niin nopeaa kuin luokissa HH1 ja HH2. Homeen kasvun kannalta suotuisat olosuhteet HH3 ja HH4 luokan materiaaleille saavutetaan, kun lämpötila vaihtelee välillä 0-50 °C ja suhteellinen kosteus on yli 85 %. Lämpötilan laskiessa alle 0 °C tai suhteellisen kosteuden laskiessa alle 85 % homeen kasvu pysähtyy ja taantuminen alkaa. Homeen kasvu pysähtyy myös yli 50 °C lämpötiloissa. (RIL 255-1 2014, s. 60-62.)

Julkisivurakenteissa homeen kasvua esiintyy yleensä kahden eri materiaalin rajapinnassa. Avohuokoisissa mineraalivillaeristeissä hometta voi kasvaa myös eristekerroksen sisällä ja tämä tulee ottaa huomioon rakenteen homehtumisherkkyyttä arvioidessa. Rajapinnan homehtumisherkkyyttä arvioidaan herkemmin homehtuvan materiaalin perusteella. Suomen ilmasto-olosuhteissa homeindeksin maksimiarvo kantavissa rakenteissa, lämmöneristekerroksissa tai sen sisäpuoleisissa materiaalikerroksissa on alle 1,0. Toisin sanoen homeen kasvua ei sallita näissä rakenteissa tai materiaaleissa ollenkaan riippumatta homehtumisherkkyydsluokasta. (RIL 255-1 2014, s. 62-64.)

Rakennuksen ulko- ja sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutokset vaikuttavat vaipparakenteiden kosteustekniseen käyttäytymiseen vuodenaajoista riippuen. Ilmanvaihdon avulla tuodaan vaihtelevan kosteuspitoisuuden ulkoilmaa rakennuksen sisälle, mikä sekoittuu asumisen aiheuttaman sisäilman kosteuden kanssa. Kosteusero sisä- ja ulkoilman välillä pyrkii tasoittumaan ulkoseinän, alapohjan ja yläpohjan yli diffuusion avulla. Sisäilman korkeampi kosteuspitoisuus aiheuttaa sen, että kosteus lähtee siirtymään sisäilmasta ulkoilmaan rakenteiden läpi. Rakennuksen sisäisestä paine-erosta ulkoilmaan verraten riippuu, siirtykö kosteutta myös konvektion välityksellä rakenteiden läpi. Rakennuksessa vallitessa ylipaine kosteus pystyy siirtymään myös

konvektiolla rakenteiden rakojen ja railojen läpi. Konvektiolla rakenteisiin pystyy siirtymään huomattavasti enemmän kosteutta kuin diffuusion avulla. (Vinha 2009, s. 8.)

Ulkoilman vesihöyrypitoisuus vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Sisäilman kosteuspitoisuus koostuu ulkoilman kosteudesta ja sisäilmankosteuden lisäyksestä. Sisäilman kosteuteen vaikuttaa ulkoilman kosteus ja lämpötila, sisäilman lämpötila, sisäiset kosteuden lähteet, sekä ilmastointi. Sisäilman kosteustuotanto kertoo, kuinka paljon enemmän sisäilmassa on vesihöyryä verrattuna ulkoilman kosteuspitoisuuteen. Rakennuksen sisälle aiheutuu kosteuslisää normaalista rakennuksen käytöstä ja asumisesta. Talvisin sisäilman kosteus on alhaisimmillaan, koska korvausilma otetaan ulkoa ja ulkoilma on suhteessa kuivempaa sisäilmaan verrattua. Kuvan 2 mukaan kylmä ulkoilma ei pysty sitomaan itseensä paljoa kosteutta, vaikka ulkoilman suhteellinen kosteus olisikin korkea. (RIL 1984, s. 102.)

Korkea suhteellinen kosteuspitoisuus aiheuttaa rakenteissa myös muun muassa muodonmuutoksia, pintojen halkeilua, pakkasrapautumista sekä teräsosien ruostumista (Vinha 2009, s. 7). Suhteellisen kosteuden ollessa alle 80 % huokoisen rakenteen huokoisissa pystytään nämä ongelmat ja vauriot välttämään. 80 % suhteellista kosteutta pidetäänkin kosteustekniseltä kannalta kriittisenä kosteutena, mitä ei saisi ylittää varsinkaan pitkäaikaisesti (Vinha 2008, s. 8).

Betonijulkisivujen pakkasrapautuminen aiheutuu betonin huokosissa olevan veden laajenemisesta jäätyessään ja sen aiheuttamasta hydraulisesta paineesta. Betonin huokosverkostoon ja huokosiin vettä pääsee esimerkiksi viistosateella, jos betoniulkopinta mahdollistaa veden kapillaarisen tai hygroskooppisen siirtymisen rakenteeseen. Betonin pakkasenkestävyyttä voidaan parantaa luomalla betoniin suojahuokoisia. (Lahdensivu 2010, s. 1.)

Rakenteet on tärkeä suojata kapillaarisesti ja painovoimaisesti siirtyvältä vedeltä sekä konvektiolla ja diffuusiolla siirtyvältä vesihöyryltä ilman- ja höyrysulun avulla (Vinha 2009, s. 6). Kosteusvaurioista valtaosa aiheutuu väärin suunnitelluista tai toteutetuista liitoksista tai detaljeista. Liitokset ja detaljit tulisi suunnitella ja toteuttaa niin, että kosteutta ei pääse haitallisesti liitoksen kautta rakenteiden sisään. Liitoksiin ja

rakenteisiin pääseen kosteuden pitää myös päästä tuulettumaan pois rakenteesta. Liitosalueelle ei saa myöskään aiheutua kylmäsiltoja, joiden kautta kosteus pääsisi kondensoitumaan rakenteiden sisälle tai pinnoille aiheuttaen pitkällä aikavälillä kosteusvaurion.

Usein liitokset ja rakennetyypit ovat rakennusfysikaaliselta kannalta kompromisseja. Niissä on tingitty lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta, jotta rakenne olisi käytettävyydeltään ja asennettavuudeltaan optimaalisin. Myös paloturvallisuuteen liittyvät vaatimukset voivat olla ristiriidassa lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden kanssa. (Vinha 2008, s. 2.)

Kuivaketju10 on kosteudenhallinnan toimintamalli, jonka avulla pyritään estämään kosteusvaurion syntyminen kaikissa rakentamisprosessin elinkaaren vaiheissa. Toimintamallin keskiössä on riskilista ja todentamisohje, joita suunnitteluvaiheen aikana täydennetään vastaamaan rakennushankkeen erityispiirteitä. Esivalittuun Kuivaketju10 riskilistaan kuuluu kymmenen oleellista kosteusriskiä, joiden on todettu esiintyvän suomalaisessa rakentamistavassa. Riskilistassa esitetään riskien nimeämisen ja kuvailujen lisäksi toimenpiteitä riskien realisoitumisen estämiseksi. Todentamisohje on suunnittelijan näkökulmasta tärkein työkalu Kuivaketju10:ssä. Todentamisohjeessa esitetään riskien primäärisen ehkäisemisen ja torjumisen keinoja riskilistan riskeille suunnittelu- ja työmaavaiheessa. Jokainen kohta käydään hankekohtaisesti läpi. Kuivaketju10 käyttö edellyttää kosteudenhallintakoordinaattorin nimeämistä vastuuhenkilönä hankkeeseen. Kosteushallintakoordinaattori valvoo ja varmistaa Kuivaketju10:n mukaisen toteutumisen. (Kuivaketju10 2020.)

Kuivaketju10 toimintamallin käyttö on yleistynyt viime aikoina, ja sitä suositellaan käytettäväksi jokaisessa rakennushankkeessa. Ympäristöministeriön asetuksen rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta perusteella rakennushankkeeseen ryhtyvän täytyy huolehtia rakennushankkeen kosteudenhallintaselvityksen laatimisesta.

Rakenteiden kosteusteknisessä tarkastelussa on tärkeää tutkia rakenteiden toimintaa ääriolosuhteissa, jotka edustavat kosteusrasitusten osalta olosuhdevaihtelujen maksimiarvoja. Tarkastelut suoritetaan olosuhteissa, jotka vastaavat 90 % kriittisyystasoa

30 vuoden ilmastodatan avulla määriteltynä. Toisin sanoen 90 % vuosista eivät ole niin kriittisiä, kuin tarkastelun kohteeksi valittu vuosi. Kosteusrasituksien maksimiarvojen käyttäminen on perusteltua, koska rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ei käytetä yleensä varmuuskertoimia ulkoilmaston eikä rakennusmateriaalien osalta. (Vinha 2014, s. 67.)

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta mitoittavien referenssivuosien löytäminen on haastavaa, koska kriittiseen tasoon vaikuttaa lukuisat olosuhdetekijät: lämpötila, suhteellinen kosteus, sademäärä, auringonsäteily, rakenneratkaisut, materiaalit, rakenteiden toimintakriteerit, rakennuksen maantieteellinen sijainti, ilmansuunnat sekä korkeus (Vinha 2014, s. 67). Tuulen nopeus, -suunta ja rakennuksen alttius tuulen virtauksille sekä pyörteille täytyy tuntea, jotta pystytään määrittelemään sateen kuormituksen vaikutus rakenteille (WUFI 2009).

Rakennusten energialaskentaan, kosteusolosuhteisiin ja sisäilmanlaatuun liittyviä rakennusfysikaalisia tarkasteluja varten on laadittu säähavaintojen perusteella kaksi rakennusfysikaalista testivuotta (Ilmatieteenlaitos 2020a). Suomessa rakennusfysikaaliseksi testivuodeksi on määritelty nykyilmastossa Jokioisen 2004 ja Vantaan 2007 olosuhteet. Tulevaisuuden mitoittavat olosuhteet on määritelty näistä vuosista ja ne on saataville vuosille 2030, 2050 ja 2100 (Vinha 2014, s. 67-68).

Rakenteesta ja ilmansuunnasta riippuen kumpi tahansa testivuodesta voi olla mitoittavampi. Jokioisen testivuotta käytetään mitoituksessa, kun rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa ulkoilman suhteellinen kosteus. Jokioisen testivuotta käytettäessä seinärakenteen tutkittavaksi ilmansuunnaksi on valittu pohjoinen, jossa auringon säteilyn lämmittävä ja kuivattava vaikutus on vähäisin. Vantaan testivuotta käytetään mitoituksessa, kun rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa ulkoilman suhteellinen kosteus ja sade. Vantaan testivuodessa tutkittavana ilmansuuntana seinärakenteelle toimii etelä, jossa viistosade aiheuttaa räsitystä seinärakenteelle ja auringonsäteily voimistaa ulkoverhoukseen sitoutuneen kosteuden diffuusiota rakenteeseen. (Vinha 2014, s. 68.)

Kuukausittain sisäinen kosteuskuormitus eli sisäisen ja ulkoisen ilman kosteuspitoisuuden ero pienenee suunnilleen lineaarisesti ulkolämpötilan kanssa. Tämä

johtuu siitä, että asukkaat pitävät ikkunoita auki useammin auki lämpiminä vuodenaikoina. Riippuen rakennuksen ilmatiiviydestä ja käyttäjien toiminnasta, asuinrakennusten sisäinen kosteuskuormitus talvella keskilämpötilan ollessa 0 °C vaihtelee 2 g/m³ ja 6 g/m³ välillä. Tavallisen kosteuskuormituksen aikana sisäinen kosteuskuormitus on noin 4 g/m³. (WUFI 2009.)

Sateelle altistuvat seinärakenteet on hyvä tutkia kummankin testivuoden avulla, jotta saadaan selville kumpi testivuodesta aiheuttaisi kriittisemmän vaikutuksen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Erityisesti betoniulkokuorinen sandwich-elementti altistuu herkästi sateelle, koska niitä käytetään julkisivurakenteina. Sateen vaikutuksesta betonisandwich-elementin ulkokuoreen sitoutuu hygroskooppisesti ja kapillaarisesti kosteutta. Sitoutuneeseen veden määrään vaikuttaa elementin ulkokuoren pinnoite. Betonin vesihöyrynläpäisevyys on pieni ja kapillaarinen veden siirtyminen vähäistä. Täten kosteuden siirtyminen on hidasta, joten sadevesi siirtyy rakenteen sisään suhteellisen hitaasti. (Vinha 2014, s. 69.)

Pohjoismaissa betonisandwich-elementtejä käytetään yleisesti julkisivurakenteina. Julkisivuratkaisut koostuvat useista eri materiaaleista, jotka käyttäytyvät kosteusteknisesti eri tavoin. Materiaalien ominaisuudet esimerkiksi betonin vesisementtisuhde, hydraatioaste sekä lämmöneristeen lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet vaikuttavat siihen, miten kosteus liikkuu rakenteessa eri ilmasto-olosuhteissa ja kuinka nopeasti ja mihin suuntaan rakenne kuivuu.

Betonisandwich-ulkoseinärakenteissa ei tarvita erillistä ulkoverhousta, vaan ulkopuolinen betonikuorielementin ulkopinta toimii ulkoverhouksena. Sandwich-elementin sisäpinta toimii ilmatiiviinä höyrynsulkukerroksena. Rakenteen saumat täytyy tiivistää tarkasti työmaalla oikeanlaisen kosteusteknisen käyttäytymisen varmistamiseksi. Betonielementtien saumat toteutetaan juotosvaluna ja liikuntasauomoissa käytetään joustavaa saumanauhaa tai elastista kittautusta. Sandwich-rakenteen lämmöneristeen tulee olla kosteutta kestävä ja myös kosteutta sitomaton. Lisäksi lämmöneristeen ulkopinnassa tulee olla jatkuva uritus kuivumiskyvyn ja kosteuden poisjohtamisen varmistamiseksi. Rakenteen kuivuminen sisälle päin riippuu lämmöneristeen vesihöyryvastuksesta. Ulkokuoren ja eristeen ulkopinnan väliin voidaan jättää myös tuuletusrako

kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi. Sandwich-elementin ulkokuoressa on vedenpoistoreiät, jotta kosteus ja mahdollinen vuotovesi pääsevät poistumaan ulos rakenteista. (Vinha 2008, s. 12; Rakentamisen kosteudenhallinta 2020.)

Eristeen urituksen tavoitteena on jakaa ilmavirtaus laajalle alueelle koko elementin pystypinta-alalla, jolloin kosteutta saadaan tuuletettua pois suurelta alalta elementistä. Ilmavirtauksen pois kuljettama kosteus määrä riippuu virtauksen massavirran suuruudesta ja kyvystä sitoa kosteutta tuuletusurasta. Mineraalivillaeristetyissä betonisandwich-elementeissä urituksella pystytään parantamaan rakenteen kuivumista, jos rakenteen sisälle pääsee vettä vuotavista saumoista tai detaljeista. Mineraalivillaeristeestä kosteus pääsee diffusoitumaan eristeen läpi uritukseen, mistä kosteus kulkeutuu ilmavirtauksen mukana pois rakenteesta tuuletusputkien kautta. Tällä tavoin uritus parantaa mineraalivillalla eristetyn betonisandwich-elementin kuivumista. Mineraalivillaeristeen läpi sisäkuori pystyy kuivumaan ulospäin toisin kuin PU-eristetyssä elementissä, joissa sisäkuori kuivuu suurimmaksi osaksi sisäänpäin. (Ojanen 2009, s. 3-4.)

VTT:n tutkimuksessa alumiinipinnoitetuissa tai pinnoittamattomissa polyuretaanieristetyissä betonisandwich-elementeissä eristeen ulkokuoren urituksella ei havaittu olevan suurta vaikutusta rakenteen kuivumiseen. Tämä johtuu siitä, että PU-eristeen umpisolurakenne estää vesihöyryn diffuusion ja näin kosteus ei pääse siirtymään urituksien kohdalle. VTT:n mukaan PU-eristeen uritus voi jopa joissakin tapauksissa edistää veden varastoitumista rakenteeseen. Vesi varastoituu pääasiassa elementin ja PU-eristeen saumakohtiin. Tutkimuksessa ei havaittu olevan merkittävää eroa kosteusteknisen toimivuuden osalta alumiinipinnoitteisen lähes diffuusiotiiviin ja paperipintaisen PU-lämmöneristeen välillä. (Ojanen 2009, s. 4-7.)

Betonisandwich-elementtien mahdollinen ulkokuoren pinnan suuri vesihöyrynvastus hidastaa rakenteen kuivumista merkittävästi, koska betonin sisältämä kosteus ei pääse poistumaan ulospäin. Tässä tapauksessa PU-eristeiden urituksesta on höytyä, koska ulkokuori pystyy kuivumaan urituksen kautta, kun elementin ulkopinta on voimakkaasti vesihöyrynvirtausta vastustava. Tämä koskee myös mineraalivillaeristettyä betonisandwich-elementtejä. Betonisandwich-elementin ulkokuoren kuivuminen on

kaikissa rakennetyypeissä hitaampaa kuin sisäkuoren riippumatta urituksesta tai ulkopinnan vesihöyryläpäisevyydestä. (Ojanen 2009, s. 3.)

Betonisandwich-elementit sisältävät noin 150 kg/m^3 vettä tuotantovaiheessa muotista irrottamisen jälkeen. Betonisandwich-elementit alkavat kuivua heti valmistumisensa jälkeen, mutta kuivuminen on hidasta. Sisäpuoleisen betonikuoren 85 % suhteellisen kosteuden tason saavuttaminen kestää 1-3 vuotta riippuen eristemateriaalin vesihöyrynläpäisevyys ja kosteuden siirtymisominaisuuksista. Betonisandwich-elementtien villaeristeiden kosteuspitoisuudet ovat yleensä alle 2 % kuivapainosta. Betonisandwich-elementin rakennekosteus eli ennen rakentamista ja rakentamisen aikana elementtiin sitoutunut kosteus otetaan simuloinneissa huomioon. Eristeen vesihöyryläpäisevyydestä riippuen sisempi eristekerros voi kuivua sisäänpäin, mutta myös ulospäin, jos eristeen vesihöyryläpäisevyys on riittävän suuri sekä ilmasto-olosuhteet tukevat vesihöyryn siirtymistä kohti ulkokuorta. Ulommasta betonikerroksesta kosteus siirtyy yleensä ulospäin, mutta mahdollisesti myös sisäänpäin yllä esitetyllä tavalla. (Kingspan 2019, s. 6-7; Nieminen & Salonvaara 2003, s. 11.)

Saumojen avulla järjestetään rakenteen tuulettuminen, esimerkiksi tuuletusputkien ja -koteloiden avulla. Betonijulkisivujen erilaisia saumausvaihtoehtoja ovat suljetut-, osittain suljetut- sekä avoimet saumat. Suljetut saumat ovat ilma- ja sadetiiviitä, kun taas osittain suljetuissa saumoissa tiivisteen massakerrokseen on sijoitettu tuuletusputkia. Suomessa käytetään paljon betonielementtien ulkokuorien saumauksessa tuuletusputkilla varustettuja kittisaumoja. Näissä ilma- ja sadetiiviys saavutetaan ulkopinnassa olevan saumausmassan avulla yhdelle tiivistekerroksella. Saumamassan ja betonielementin välisen tartunnan laatu edellyttää laadunvarmistusta säilyvyyden ja sadevesitiiviiden osalta. (RIL 255-1 2014, s. 126.)

Ulkokuoren taakse päässyt vesi pitää johtaa pois kaikista vaakasuuntaisista liitoksista liittyvien rakenteiden kanssa, kuten ikkuna- ja julkisivujen välisistä liitoksista. Vedenpoistoratkaisuissa pitää ottaa huomioon voimakas viistosade, joka voi aiheuttaa vuotoja saumoihin. Rakenteen tuulettuminen pitää varmistaa kosteusteknisen toiminnan kannalta. (RIL 255-1, 2014, s. 126.)

Viistosateen määrään vaikuttaa pystysuoran sateen intensiteetti, tuulen nopeus ja pisaroiden putoamisnopeus. Syksyisin viistosateen määrät ovat suurimmillaan. Vapaa viistosateen määrä on noin 20-30 % pystysuoran sateen määrästä. Vapaa viistosade tarkoittaa häiriöttömästi putoavan sateen vaakakomponenttia. Korkeisiin rakennuksiin kohdistuu voimakkaampaa viistosateen rasitusta kuin matalimpiin rakennuksiin. Viistosateen rasitus on suurinta rakennuksen yläosissa ja nurkissa johtuen suuremmasta tuulen nopeuspaineesta. Viistosateen laskenta käydään läpi Liitteessä 3 standardin mukaisesti. (RIL 255-1 2014, s. 121; SFS-EN ISO 15927-3 2009, s. 4.)

Pintamateriaalien vedenimukyky vaikuttaa viistosateessa vesikalvon syntymiseen rakenteen pinnalle. Tiiviit ja huokoiset materiaalit eroavat tässä toisistaan selvästi. Tiiviitä julkisivumateriaaleja ovat esimerkiksi lasi, metalli ja muovi sekä osa laatoista. Vettä hylkivä maali tai rappaus lasketaan myös tiiviiksi materiaaliksi. Tiiviiden seinien ulkopintaan muodostuu sateen alkuvaiheessa alaspäin valuva vesikalvo, joka riippuu ulkopinnan pinnankarheudesta. Vesi ei imeydy oikein toteutetussa rakenteessa rakenteeseen. Huokoisia materiaaleja, joihin viistosade imeytyy ovat betoni, puu, tiili ja rappaus. Huokoiseen julkisivupintaan viistosade imeytyy kapillaarisesti täyttäen huokossysteemiä vedellä. Julkisivupinnalle syntyy vesikalvo vasta, kun sadeveden määrä ylittää julkisivumateriaalin kapillaarisen imunopeuden. Näin julkisivun pintaan syntyvä vesikalvon muodostuminen viivästyy. Materiaalien imukyky vaihtelee paljon niiden huokosrakenteesta riippuen. Betoniin vesi imeytyy kapillaarisesti suhteellisen hitaasti, riippuen betonin vesi-sementtisuhteesta. Vesikalvo muodostuu maalaamattomille betonijulkisivuille melko hitaasti, joten suuri osa vedestä imeytyy kapillaarisesti rakenteeseen. Pitkään jatkuva sade voi täyttää huokosrakenteen kapillaarihuokokset vedellä. (RIL 255-1 2014, s. 121.)

Betonisen julkisivupinnan pinnankäsittely vaikuttaa viistosateella kosteuden siirtymiseen ja betoniulkopinnan vesikalvon muodostumiseen. Pintakäsittely vaikuttaa kosteuden imeytymiseen betoniulkopinnasta betonin sisään ja kosteuden poistumiseen betonista sekä rakenteen kuivumiseen. Pinnoitteen kosteustekniset ominaisuudet vaikuttavat seinärakenteen lisäksi itse pinnoitteeseen kohdistuvaan rasitukseen. Kosteusteknisesti toimivia pinnoitteita ovat sellaiset, jotka päästävät lävitseen hyvin vesihöyryä ja hylkivät vettä. (RIL 255-1 2014, s. 128 & s. 131.)

Julkisivujen pinnoitteiden kosteudenläpäisyominaisuudet pitää valita niin, että rakenteeseen ei synny korkeaa ja haitallista kosteuskertymää. Rakenteen pitää myös kuivua mahdollisimman nopeasti. (RIL 255-1 2014, s. 123.)

Betoniulkokuoren ulkopinnassa viistosateen kapillaarisen kosteuden siirtymisen estävä maalikerros nopeuttaa betonisandwich-elementin kokonaiskosteuspitoisuuden kuivumista. Tämä johtuu siitä, että viistosateen aiheuttama kosteus ei pääse imeytymään rakenteeseen, jolloin rakenteen kosteuspitoisuus pysyy huomattavasti pienempänä kuin maalaamattoman rakenteen kosteuspitoisuus, johon kosteus voi siirtyä. Toisaalta maalaamaton pinta kuivuu nopeammin, mutta kuitenkin ohuen maalikerroksen vesihöyrynläpäisevyys on suhteellisen pieni verrattuna maalatun pinnan viistosateelta saamaan suojaan. (Nieminen & Salonvaara 2003, s. 34-35.)

Ulkoseinärakenteen suunnittelussa pitää huomioida ulkoverhouksen taakse päässyt vuotovesi. Vuotoveden poistuminen rakenteesta pitää ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa (RIL 255-1 2014, s. 123). Haitallinen lumen ja jään kertyminen julkisivuun pyritään estämään suunnittelemalla julkisivu mahdollisimman tasaiseksi ja sileäksi.

Kriittisiä kohtia betonisandwich- ulkoseinissä ovat vanhat rapistuneet tai puutteellisesti asennetut elementtisaumaukset, joista kosteus, vesi ja ilmavirtaus pääsee rakenteen sisään mahdollistaen vaurioitumisen. Ikkunoiden ja läpivientien puutteelliset ja vanhat tiivistykset mahdollistavat lisäksi kosteuden siirtymisen rakenteen sisään. Rakenteen tuuletusvälin ja pystysuuntaisten urien tukkeutuminen valmistus- ja asennusvaiheessa aiheuttaa kosteuden puutteellista poistumista rakenteesta. Veden lammikoituminen elementtien vaakasuuntaiseen liitokseen mahdollistaa myös lisääntyvän kosteusrasituksen. (Rakentamisen kosteudenhallinta 2020.)

Betonin kosteustekniset ominaisuudet riippuvat betonin huokoisuudesta ja huokosjakaumasta. Betonin huokosrakenteeseen vaikuttavat vesi-sementtisuhde, ilmamäärä, runkoaineen raekoko ja betonin hydratoitumisaste. Mitä suurempi betonin vesi-sementtisuhde on, niin sitä enemmän betonissa on kapillaarihuokosia, joissa vesi pystyy liikkumaan vapaasti. Kapillaarihuokokset ovat noin yhden mikrometrin kokoisia

huokosia, joissa vesi pääsee liikkumaan ja jäätymään. Kapillaarihuokosista muodostuneissa katkeamattomissa ketjustoissa, vesi pystyy imeytymään kapillaarivoimien avulla tehokkaasti betoniin. Vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,4 betonissa on todella vähän kapillaarihuokosia ja vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,6 muodostuva kapillaariverkosto ei ole jatkuva. Vesi-sementtisuhteeseen vaikuttaa myös rakenteen ikä. (RIL 255-1 2014, s. 275.)

Betoni on hygroskooppinen materiaali, jolla pienien huokosien seurauksena on korkea hygroskooppinen tasapainokosteus. Betonin vesihöyrynläpäisevyys on riittävän pieni toimiakseen itsestään ilma- ja höyrysulkuna rakenteessa. Betonin vesihöyrynläpäisevyys riippuu huokosrakenteesta, kosteuspitoisuudesta ja lämpötilasta sekä saumojen tiiviyydestä. (RIL 255-1 2014, s. 275.)

Julkisivujärjestelmä määritellään rakennuksen vaipan osaksi. Julkisivujärjestelmä koostuu vaaka- tai pystyprofiileista, jotka on liitetty rakennuksen kantavaan runkoon. Julkisivujärjestelmät suunnitellaan itsekantaviksi rakenteiksi, mitkä siirtävät kaikki niihin kohdistuvat kuormat rakennuksen kantavalle rungolle. (SFS-EN 13830:2015, s. 12.)

Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun lasirakenteen ja muun rakenteen välisestä liittymäsaumasta on aiheutunut toteutuneissa kohteissa ongelmakohta, josta sadevettä on päässyt rakenteen sisään aiheuttaen kosteusvaurioita rakenteisiin. Myrskysateilla tuulenpaine pystyy siirtämään vettä rakenteen sisälle pienestäkin vuotokohdasta. Paineelliselle vedelle mitoittaminen on lähtökohtana lasiseinien ja niiden liittymien suunnittelulle ja rakentamiselle. (Pekkala & Vikman 2009, s. 2.)

Järjestelmäjulkisivun saumojen täytyy olla joustavia, koska saumoihin kohdistuu olosuhteiden mukaan liikkeitä. Saumojen pitää olla vesitiiviitä sekä myrskyisellä säällä tuulen aiheuttaman vedenpaineen kestäviä. Liitokset viereisiin rakenteisiin tehdään toleranssit huomioon ottaen tiiviinä sisä- ja ulkopuolilta. (Pekkala & Vikman 2009, s. 9.)

Lasiulkopinnan tulee olla vedenpitävä sekä myös mitoitusnormien mukaiseen tuulenpaineeseen asti vedenpainetta pitävä. Sisäpinnalla ilmatiiviys, riittävä lämmöneristys ja nopea kuivumiskyky ovat tärkeitä ominaisuuksia. Kuivissa sisätiloissa

kosteuden tiivistyminen lasirakenteen sisäpintaan ei ole kylminä kuukausina ongelma, koska sisäilman suhteellinen kosteus on talvella yleensä alhainen johtuen ulkoilman alhaisesta kosteuspitoisuudesta. (Pekkala & Vikman 2009, s. 8.)

Rakenteen vesi- ja ilmatiiviyden kannalta on syytä kiinnittää huomioita tiivistysmateriaalien valintaan. Tiivistysmateriaalien pitää kestää suuria lämpötilan vaihteluita, erityisen alhaisia ja korkeita lämpötiloja, UV-säteilyä sekä muita säärasituksia. Asennuksen aikaiseen saumojen tiivistyksen onnistumiseen tulee kiinnittää erityistä huolellisuutta, koska pienestäkin halkeamasta voi päästä runsaasti vettä rakenteeseen. Saumojen kutistumisen seurauksena vesi voi päästä rakenteeseen ja rakennuksen sisäpuolelle.

Järjestelmäjulkisivut tehdään CE-merkittyinä niitä koskevien tuotestandardien vaatimusten mukaisesti. Tuotestandardissa on esitetty erilaisia vaatimustasoja esimerkiksi tuulenpaineen tai vedenpitävyyden suhteen erilaisiin käyttöolosuhteisiin liittyen. (SFS-EN 13830:2015.)

Julkisivujärjestelmillä on lukuisia tuoteominaisuuksia, jotka koskevat rakennusfysikaalisia ominaisuuksia. Julkisivujärjestelmän sateenpitävyys tarkoittaa kykyä estää sadevesien tunkeutuminen rakennukseen. Suunnittelussa tulee huomioida mahdollinen julkisivujärjestelmän sisään päässyt vesi, jonka pitää pystyä poistumaan rakenteesta hallitusti. Sateenpitävyyden ja ilmapitävyyden pitkäaikaiskestävyys saumojen ja tiivisteiden osalta on varmistettava. (SFS-EN 13830:2015, s. 15-18.)

Julkisivurakenteille asetetaan määräyksiä koskien tuulenpaineen kestävyyttä. Julkisivujärjestelmän tulee kestää sisä- ja ulkopuolen välinen ilmanpaine-ero ilman vaurioita tai pysyviä muodonmuutoksia. Julkisivujärjestelmien tuotestandardissa lämmönläpäisykertoimelle, ilmapitävyydelle sekä pitkäaikaiskestävyydelle asetetaan vaatimuksia. Vesihöyrynläpäisevyyden osalta ei-läpinäkyville verhousosille höyrynsulku on valittava rakennukselle määriteltujen lämpö- ja kosteusteknisten olosuhteiden mukaisesti. (SFS-EN 13830:2015, s. 15-18.)

Rakennuspellityksien tavoitteena on suojata rakenteita veden ja kosteuden pääsystä rakenteiden sisään. Pellityksien tärkeimpiä tavoitteita on estää sateella veden pääsy rakenteeseen. Pellityksien suunnittelussa kiinnitetään huomiota muun muassa pellityksen funktionaalisuuteen, kiinnitykseen ja liitoksien vedentiiviyteen. Pellityksen tärkein tehtävä julkisivuissa on suojata rakenteita, liitoksia ja saumoja ympäristö- ja ilmasto-olosuhteilta. Ikkunoiden ulkopintojen alaosissa käytetään vesipeltejä, joiden tehtävä on estää veden pääsy rakenteen sisään. (RT 80-11202 2016, s. 1.)

Korkeissa rakennuksissa peltien saumat tiivistetään olosuhteisin soveltuvalla elastisella saumamassalla tai -kitillä, koska julkisivunpintaan kohdistuva tuulenpaine voi työntää vettä rakenteisiin pienistäkin rei'istä ja ylöspäin. Ikkunapellityksen alle asennetaan myös yleensä myrskypelti estämään tuulen aiheuttama veden virtaus julkisivua ylöspäin rakenteen sisään. (RT 80-11202 2016, s. 12.)

Yleisimmät virheet betonijulkisivujen pellitysdetaljeissa ovat liian pienet peltien kallistukset ulospäin, virheelliset kiinnitykset karmiin ja betoni ulkokuoreen, pohjamateriaalin puuttuminen ikkunan pellityksissä sekä liian lyhyt ylitys seinästä ulospäin. Lisäksi yleisiä havaittuja virheitä ovat peltiprofiilien vääränlaiset dimensiot ja profiilimuodot. (Tuomainen 2015, s. 20.)

3.3 Rakenteiden ilmatiiviys

Rakennusfysikaalisessa laskennassa rakenteet oletetaan niin ilmatiiviiksi, ettei niiden läpi tapahdu ilmavirtauksia. Ilmavirtausta rakenteen läpi ei sallita. Ilmavirtaus rakenteessa ja rakenteen läpi voidaan huomioida vauriotarkasteluissa. (SFS-EN 15026 2007, s. 18.)

Rakenteiden läpi tapahtuvat ilmavirtaukset heikentävät rakenteiden rakennusfysikaalista toimivuutta. Kosteusvaurion riski kasvaa, kun kostean ilman virtaukset vaipparakenteisiin lisääntyvät ja rakenteen sisäpuoleisten pintojen lämpötilat laskevat. Lisäksi epäpuhtauksien kulkeutuminen sisäilmaan mahdollistuu vaipparakenteiden sisästä ja energiankulutus kasvaa lisääntyneiden ilmavuotojen takia. (Vinha 2009, s. 9.)

Seinärakenteiden ilmatiiviyteen vaikuttaa elementtien liitoksien ja läpivientien tiiveys. Rakenteiden ilmapitävyyden parantamiseksi on syytä kiinnittää huomiota liitoksiin ja liikuntasaumoihin varsinkin toteutuksen osalta. Julkisivuelementeissä yhdeksi ongelmaksi muodostuu liitosten suuret voimasuureet. Betonisten vaipparakenteiden liitokset ja saumat tehdään juotosvalulla. Liikuntasauvoissa käytetään joustavia elastisia kittauksia ja bitumikermikaistoja. (Valjus 2019, s. 76; Vinha 2008, s. 9.)

Huoneessa olevan alipaineen vaikutuksesta ulkoa sisälle rakenteen läpi siirtyvä viileä ilma kuivattaa lämmitessään rakenteita, koska kylmä ilma ei pysty sitomaan itseensä läheskään niin paljon kosteutta kuin lämmin sisäilma. Lämmitessään absoluuttinen kosteuspitoisuus pysyy ilmassa vakiona, mutta suhteellinen kosteuspitoisuus laskee, koska lämpötila nousee. Tämä kuivattaa mahdollisesti rakenteita, kun kosteuspitoisuus pyrkii tasoittumaan eli kosteutta siirtyy rakenteista ulkoa virtaavaan kuivempaan ilmaan. Toisaalta rakenteen lämmöneristyskyky heikkenee viileän ilman konvektion vaikutuksesta rakenteen sisällä. Seinien kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi rakennukset tulisi suunnitella hieman alipaineisiksi. Tällöin mahdollisen korkean sisäilman suhteellisen kosteuspitoisuuden aiheuttama kosteusvaurion todennäköisyys madaltuu merkittävästi.

Ilma voi virrata rakennuksen vaipan sisään ja läpi. Lämmön ja kosteuden siirtyminen virtaavan ilman mukana on yleensä määräävämpi tekijä kuin lämmön siirtyminen konduktiolla sekä kosteuden siirtyminen diffuusiolla joissakin tapauksissa. Ilman virtaus rakennuksen vaipan läpi voi vaikuttaa huoneen ilmanvaihtoon merkittävästi. Ilman virtaus voi tarkoituksellisesti poistaa kosteutta ilmaraoista tai lasien väleistä tai tarkoituksettomasti tunkeutua liitoksiin ja halkeamiin. Ilmanvaihdolla on merkittävä rooli vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa, koska ilmanvaihdon avulla poistetaan ylimääräinen kosteus rakennuksen sisältä (Vinha 2008, s. 10).

Ilmatiiviyys on yksi oleellisimpia seinärakenteiden ominaisuuksia. Rakennuksen ulkovaipan keskeinen tavoite on ylläpitää sisäilman suotuisat olosuhteet rakennuksen käyttäjille ja rakennusmateriaaleille. Ilman konvektiota seinärakenteen läpi esiintyy käytännössä vain viallisisissa tai vikaantuneissa komponenteissa ja rakennusosissa. Rakennusosa voi olla viallinen jo työmaalle saapuessaan tai se voi vikaantua kuljetuksen

ja käsittelyn aikana. Standardien vastainen asennustapa ja kuormittavat ilmasto-olosuhteet voivat altistaa rakennusosan vikaantumiselle. Rakennuksen ilmatiiviyyttä voidaan tutkia etukäteen kolmiulotteisilla nestemekanikan virtaus simulaatio-ohjelmilla. Rakennuksen ilmatiiviys vaikuttaa rakennuksen energiakulutukseen ja täten rakennuksen energiatehokkuuteen (Kauppinen 2011, s. 1).

Ilmatiiviys saadaan aikaan vaipparakenteisiin asetettavalla ilmasululla, jonka tehtävänä on estää haitallinen ilmanvirtaus rakenteeseen ja sen läpi. Ilmasulku yleensä toimii samalla höyrysulkuna, joka estää vesihöyryn siirtymistä konvektiolla vaipparakenteisiin rakennuksen sisäpuolelta. Ilmasulku myös estää terveydelle ja viihtyvyydelle haitallisten aineiden kulkeutumisen rakenteiden ulkoa ja rakenteiden sisältä sisäilmaan. Ilmasulun tarkoituksena on estää ulkoa sisäpuolelle virtaava viileän ilman virtaus, siten, että vaipparakenteen sisäpinnan lähelle ei synny homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Lisäksi ilmasulku pienentää rakennuksen energiankulutusta estäen lämpimän ilman virtausta sisältä ulos sekä mahdollistaa rakennuksen ilmanvaihdon sellaiseksi, että rakennus pystytään pitämään jatkuvasti alipaineisena ulkona vallitsevaan ilmanpaineeseen nähden. (RIL 255-1 2014, s. 46.)

Ilmavuodot aiheuttavat suurimman osan sisäilman kosteuden aiheuttamista kosteusvaurioista rakenteiden sisällä. Tämä johtuu siitä, että kosteutta voi siirtyä rakenteeseen ilmavirtauksen mukana konvektiolla merkittävästi enemmän kuin diffuusiolla. Ilmasulun tarkka ja suunnitelmien mukainen toteuttaminen kosteusteknisen toiminaan kannalta on erityisen tärkeää. Jatkoskohdat, liitokset ja läpiviennit pitää toteuttaa mahdollisimman ilmatiiviiksi. (RIL 255-1 2014, s. 41.)

Vuotoilmavirtaus eli hallitsemattoman ilmavaihdonvirtaus aiheutuu paine- ja lämpötilaeroista rakenteen eri puolien välillä sekä myös ilmanvaihtojärjestelmän puutteellisesta toiminnasta. Lisäksi hallitsematon vuotoilmavirtaus riippuu vaipan ilmanpitävyydestä, rakennuksen korkeudesta sekä tuulen nopeudesta. Ulkovaipan ilmanpitävyyttä voidaan mitata tiiviysmittauksilla, joissa vaipan eri puolille aiheutetaan 50 pascalin ali- ja ylipaine-ero. Samalla mitataan paine-eron ylläpitämiseen tarvittavaa ilmamäärää. Rakennuksen ilmatiiviyyttä kuvataan ilmanvuotoluvulla n_{50} [1/h], joka kuvaa 50 pascalin paine-eron aikaansaamaa ilmavirtauksen määrää sisätilavuutta kohti. Eli

ilmanvuotoluku kertoo rakennusten tiiviyserot 50 pascalin paine-eron vallitessa. Tällaisia olosuhteita esiintyy usein jo aivan tavanomaisilla tuulilla poislukematta korkean rakentamisen olosuhteita. (Kauppinen 2011, s. 1 & 9; Tasaustalaskentaopas 2018, s. 47.)

Ilmavuotoluku voidaan esittää myös rakennuksen vaipan pinta-alaa kohti. Ulkovaipan ilmavuotoluku q_{50} [$\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$] tarkoittaa vaipan yli 50 pascalin paine-erolla yhden tunnin aikana virtaavaa ilmamäärä suhteutettuna rakennuksen vaipan pinta-alaan (Ympäristöministeriö 2017, s. 2). Rakennuksen ulkovaipan läpi tapahtuvat ilmavirtaukset voivat tuoda mukanaan kosteutta, joka voi mahdollisesti kerääntyä rakenteeseen ja täten aiheuttaa kosteusvaurioita. Ilmanvirtaus rakenteen läpi voi aiheuttaa mikrobien kulkeutumista rakenteen sisältä sisäilmaan ja näin aiheuttaa sisäilmanlaadun heikkenemistä.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C3 rakennusosien ja rakenteiden ilmanpitävyydestä asetetaan ehtoja rakennuksen ulkovaipan ja tilojen välisten rakenteiden ilmatiiviydelle. Rakenteiden täytyy olla niin ilmapitäviä, ettei vuotokohtien läpi virtaavat ilmavirtaukset saa aikaan huomattavia haittoja rakenteille, rakennuksen käyttäjille tai rakennuksen energiatehokkuudelle. Ilmavaihtojärjestelmän pitää myös pystyä toimimaan suunnitellulla tavalla. Rakenteiden liitokset ja läpiviennit täytyy suunnitella ja toteuttaa tarkasti määräyksien ja suunnitelmien mukaisesti. Ikkunoiden ja ovien liitokset tulee olla ilmapitäviä ja liitoksien tiivistämiseen käytettävät tuotteet sellaisia, että ne kestävät vallitsevat rasitukset vaurioitumatta eivätkä vaurioita ympäröiviä rakenteita. (RakMK, 2010, s. 5.)

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa annetaan ohjeita rakenteiden tiiviyn tasosta ilmavuotoluvun avulla. Vuotoilmavirtoja ja ilmanpitävyyttä pystytään arvioimaan mittaustulosten avulla. RakMK Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennassa esitellään tyypillisiä rakennusten ilmanvuotolukuja. Hyvä ilmanpitävyys saavutetaan pientalolle ilmanvuotoluvun n_{50} ollessa välillä $1,0 \leq n_{50} \leq 3,0$ 1/h ja asuinkerros- ja toimistorakennukselle ilmanvuotoluvun n_{50} ollessa välillä $0,5 \leq n_{50} \leq 1,5$ 1/h. (RakMK 2018, s. 22.)

Normaaleissa käyttöolosuhteissa rakennuksessa tulisi vallita pieni alipaine, joka on noin 0-10 Pa. Rakennuksien ilmatiiviyn mittaauksissa tulee aina selvittää rakennuksen painesuhteet, koska jos esimerkiksi tuloilmareitit on tukittu voi alipaine nousta rakennuksessa haitallisen korkeaksi, mikä taas osaltaan lisää mahdollisten ilmavuotoreittien kautta siirtyvää ilmamäärää. Poistoilmareitin tukkiminen voi aiheuttaa rakennukseen suuren ylipaineen, josta voi seurata kosteuden kondensoitumista pinnoille ja rakenteisiin. Kosteus voi toisinaan diffusoitua rakenteisiin puutteellisen höyrystyksen seurauksena, jos höyrystys ei ole jostain syystä tiivis. (Kauppinen 2011, s. 2-3.)

Ilmanpitävyyttä on tutkittu vuosina 2008-2009 rakennetuissa asuin- ja palveluskohteissa, joista saatiin ilmavuotolukujen arvoiksi 0,3-1,0 l/h. Yleisimmät vuotokohtat olivat ikkunatiivisteissä, parvekeovissa ja ulko-ovissa. Ilmavuotokohtia voidaan paikantaa merkkisavukokeilla ja lämpökuvauksilla. Rakennuksen tiiviyn parantaminen on energiakustannuksien pienentämisessä tehokas keino. Tiiviyn parantamisen lisäkustannus on pieni verrattuna siitä saatavaan hyötyyn. (Kauppinen 2011, s. 4 & 6.)

Betonisten vaipparakenteiden hyvä ilmapitävyys saavutetaan, kun liitokset tehdään juotosvalulla tai joustavien elastisten saumojen avulla. Lämpöviennit tiivistetään polyuretaanilla ja kittaamalla. Ilmasulkujen lämpöviennit tiivistetään lämpöviennilaipoilla tai muiden toimivien kaulusten avulla. Liikuntasaumojen suunnittelussa otetaan huomioon rakenteiden liikkeet ja niiden vaikutukset saumojen ilmapitävyyteen. Ilmatiiviyn parantaminen vähentää rakennuksen energiankulutusta, ulkovaipan rakenteiden kosteusriskejä ja ilmavirtauksen tunnetta iholla. (Oulun rakennusvalvonta 2014, s. 1-2.)

Rakennusvaipan pieni ilmanvuotoluku ei kuitenkaan takaa täydellistä ilmatiiviyttä, koska rakennusvaipassa voi esiintyä paikallisesti suuria ilmavuotokohtia. Tämän takia ilmasulun liitosten ja reikien huolellinen tiivistäminen on tärkeää ottaa huomioon sekä suunnittelu- että toteutusvaiheessa. (Tasauslaskentaopas 2018, s. 25.)

Rakennuksen vaipan ilmavuotoluku q_{50} saa olla maksimissaan 4,0 [m³/h·m²]. Rakennuksen vaipan ilmavuotoluku saa ylittää tämän arvon vain, jos rakennuksen käytön vaatimat rakenneratkaisut sitä edellyttävät. (Ympäristöministeriö 2017, s. 13.)

Rakennusta suunniteltaessa lämpöhäviön laskennassa voidaan käyttää ilmavuotolukuna $q_{50} = 4,0 \text{ [m}^3/\text{hm}^2\text{]}$, jolloin ilmapitävyyttä ei tarvitse erikseen laskemalla todistaa. Pienemmän ilmavuotoluvun käyttö on sallittua vain, jos se pystytään osoittamaan jälkikäteen varmuudella toteen mittaamalla tai muulla tieteellisellä tai kokeellisella menetelmällä. (Tasauslaskentaopas 2018, s. 25.)

Mitä suurempia ilmavuotoluku ja lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä ovat, niin sitä suurempi lämpöhäviö syntyy. Ilmavuotoluku $n_{50} \text{ [1/h]}$ kertoo kuinka monta sisäilman tilavuutta $\text{[m}^3\text{]}$ virtaa rakennuksesta ulos tunnissa, kun sisä- ja ulkoilman välillä vallitsee 50 pascalin paine-ero (Kauppinen 2011, s. 1).

Tuuli aiheuttaa rakennuksen tuulenpuoleiselle julkisivulle positiivisen ilmanpaineen. Ilmanpaineen kasvu riittävän suureksi voi altistaa rakennuksen ulkokuoren ilmanläpäisylle. Tuuli voi aiheuttaa ilman virtausta eristekerroksissa, mikä kasvattaa rakennuksen lämpöhäviötä, jos tuulensuojakerros ei ole riittävä tai huolimattomasti asennettu. Tuulenpaineen vaikutuksesta ilma voi myös virrata rakennuksen sisään ja virrata hallitsemattomasti ilmavuotokohdista ulos, mikä aiheuttaa ei toivottua ilmanvaihtoa ja samalla heikentää rakennuksen energiatehokkuutta, kun lämpö siirtyy virtaavan ilman mukana pois rakennuksen sisältä.

Hyvä rakennuksen vaipan ilmapitävyys estää ilman virtaukset rakennuksen vaipan läpi. Hyvä vaipan ilmapitävyys on tärkeää, koska sillä voidaan kontrolloida lämpimien tilojen ilmanvaihtoa sekä välttää kasvavilta lämmityskustannuksilta. Samalla vältetään myös haitalliset kosteuden ja lämmönsiirtymiseltä rakenteiden läpi.

Korkeissa rakennuksissa hormivaikutus pitää ottaa huomioon ilmapitävyyden suunnittelussa. Osastoivien rakenteiden tiiviys on avainasemassa hormivaikutuksen minimoimisessa, koska hyvällä tiiviydellä vältetään ylimpien kerrosten sisätilojen ylipaineen kasvamisesta haitalliseksi rakenteiden kosteus- ja lämpöteknisen toiminnan sekä säilyvyyden kannalta.

Rakennuksen sisäpuolella vaikuttavan suuremman ilmanpaineen aiheuttama kostean ilman kondensaatio rakenteen sisään on pääasiallinen kosteusvaurion aiheuttaja.

Rakenteilla, jotka ovat turvallisia Glaser-menetelmän pohjalta, voi silti ilmetä ongelmia ilmavirtauksien osalta. Glaser-menetelmää käsitellään tarkemmin kappaleen 4.4 Kosteuden siirtyminen lopussa. Suorituskykyvaatimukset rakenteen ilmapitävyydelle eivät aina ole realistisia. Ongelmia esiintyy usein myös kolmiulotteisissa simuloinneissa muun muassa liitoksien ja kylmäsiltojen osalta. (the Wit 2009, s. 149.)

4 LÄMPÖ JA KOSTEUS RAKENTEISSA

Lämpö ja kosteus pystyy varastoitumaan ja poistumaan rakenteista niiden ominaisilla siirtymistavoilla. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa lämpö pystyy siirtymään johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä rakenteissa sekä rakenteiden ja ympäristön välillä. Kosteudensiirtyminen otetaan rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa huomioon diffuusion, kapillaarisen siirtymisen, kosteuskonvektion sekä painovoimaisen veden siirtymisen avulla. Rakennusmateriaalit pystyvät varastoimaan itseensä lämpöenergiaa ja luovuttamaan sitä ympäristön välillä. Samalla tavalla suurin osa rakennusmateriaaleista pystyy sitomaan ja varastoimaan itseensä kosteutta ympäröivästä ilmasta ja rakenteista. Materiaalit pystyvät kuivumaan kosteudensiirtymistavoilla ympäristöönsä. Materiaalien ominaiset lämpö- ja kosteustekniset materiaaliominaisuudet ovat kytkeytyneet toisiinsa. Lämpötilan muutos vaikuttaa materiaalien kosteudensiirtymisnopeuteen ja kosteuden varastointikykyyn. Toisaalta kosteuspitoisuudenmuutos vaikuttaa rakennusmateriaalien lämpötekniisiin materiaaliominaisuuksiin.

Tässä kappaleessa käsitellään rakennusmateriaalien lämmön ja kosteuden varastoitumista ja luovuttamistapoja sekä perehdytään rakenteiden lämmön ja kosteuden siirtymisen matemaattisiin esityksiin. Tämän kappaleen jälkeen lukijalla on riittävä teoreettinen rakennusfysikaalinen tuntemus suorittamaan lämpö- ja kosteusteknisiä simulointeja erilaisilla simulointiohjelmilla.

4.1 Lämmön varastoituminen

Materiaalien lämmönvarastointikyky riippuu niiden ominaislämpökapasiteetista. Ominaislämpökapasiteetti määritellään kappaleeseen siirtyvän lämpömäärän, kappaleen lämpötilan muutoksen ja kappaleen massan avulla. Ominaislämpökapasiteetti on energianmäärä [J], joka vaaditaan yhden kilogramman massaisen kappaleen lämpötilan nostamiseen yhdellä asteella. Ominaislämpökapasiteetti lasketaan kaavasta

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad (6)$$

missä C_p on ominaislämpökapasiteetti [J/kgK],
 Q on lämpöenergia [J],
 m on massa [kg] ja
 ΔT on lämpötilan muutos [K].

Ominaislämpökapasiteetti kuvaa kiinteän aineen tai nesteen tehokkuutta varastoida tai luovuttaa lämpöenergiaa massaansa kohden ilman suurta lämpötilan muutosta. Esimerkiksi vesi pystyy varastoimaan itseensä lämpöenergiaa tehokkaasti lämpötilan muuttuessa vain vähäsen, ja siksi sillä on suuri ominaislämpökapasiteetti. Toisin sanoen suuri materiaalin ominaislämpökapasiteetti johtaa pienempään lämpötilan muutokseen kuin pienen ominaislämpökapasiteetin omistava materiaali. Suuri lämpötilan muutos kertoo siitä, että materiaali ei ole tehokas varastoimaan lämpöenergiaa itseensä. Kiinteille aineille ja nesteille voidaan käyttää simuloitaessa vakio ominaislämpökapasiteetteja.

Kaasujen ominaislämpökapasiteetti riippuu sen hetken kaasun termodynaamisesta tilasta. Isobaarisessa prosessissa entalpian muutos on yhtä suuri kuin siirtyvä lämpöenergia. Entalpia on energiaa ilmaiseva suure, joka on johdettu sisäenergiasta. Entalpian muutos lasketaan Künzelin (Künzel 1995, s. 26) mukaan

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (7)$$

missä H on kokonaisentalpia [J/m³],
 t on aika [s],
 ρ on materiaalin tiheys [kg/m³],
 C_p on materiaalin ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)] ja
 T on lämpötila [K].

Rakennusmateriaalien lämpöenergian varastoitumiskykyyn vaikuttaa myös materiaalien kosteuspitoisuus. Materiaaliin valmiiksi sitoutunut kosteus ja materiaaliin siirtyvä kosteus lisäävät lämpöenergian varastoitumiskykyä. (Künzel 1995, s. 26.)

Materiaaliin sitoutuneen kosteuden entalpiamuutoksen laskemiseen löytyy kirjallisuudesta kaavoja. Yksi näistä on Künzelin esittämä yhtälö (Künzel 1995, s. 26), jossa otetaan huomioon materiaalin kosteus- ja jäänpitoisuus sekä veden ja jään ominaislämpökapasiteetit.

Vesihöyryn entalpiamuutos on pieni verrattuna veden tai jään entalpiamuutokseen ja täten vesihöyryn varastoimaa energiaa ei tarvitse ottaa huomioon. Vesihöyryn latentti lämpö otetaan kuitenkin huomioon. (Künzel 1995, s. 26-27.)

Latenttilämpö eli piilevä lämpö tarkoittaa vesihöyryyn sitoutunutta lämpöenergiaa, joka vapautuu ilmaan vesihöyryn tiivistyessä pinoille tai sitoutuu veden höyrystyessä kaasuksi. Eli latenttilämpö kertoo, kuinka paljon energiaa tarvitaan aineen faasimuutokseen. Latenttilämpö on entalpianmuutos, joka tapahtuu aineen olomuodon muuttuessa lämpötilan ja paineen pysyessä vakioina prosessin ajan.

Vesihöyryn diffuusion ja faasimuutoksen yhteisvaikutus otetaan huomioon Künzelin (Künzel 1995, s. 29) mukaan lämmönsiirtoyhtälössä, joko lämmönlähteenä tai lämmönviejänä seuraavasti

$$S_h = h_v \nabla g_v, \quad (8)$$

missä S_h on lämmönlähde tai -viejä kondensaatiossa tai haihtumisessa [$\text{J}/\text{m}^3\text{s}$],
 h_v on faasimuutoksen latentti lämpö, joko kondensaatiossa tai haihtumisessa [J/kg] ja
 g_v on vesihöyryn diffuusiovirta materiaalin läpi [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$].

Faasimuutoksen latenttilämpö koostuu veden höyrystymis- tai haihtumisentaltiasta, joka vedellä on $L_v = 2500 \text{ kJ/kg}$ sekä materiaalikohtaisesta sorptio entaltiasta. Materiaalikohtainen sorptio entalpia voidaan tosin jättää huomiotta, kun suhteellinen kosteus materiaalissa on yli 50 %. (Künzel 1995, s. 29.)

Latentit lämpövaikutukset ovat usein lyhytkestoisia ja niitä ei oteta huomioon materiaalien oikeita lämmönjohtavuuden arvoja laskiessa. Latentit lämpövaikutukset eivät ole materiaalien luonteenomaisia ominaisuuksia vaan riippuvat esimerkiksi lämmöneristeen viereisistä materiaalikerroksista. (WUFI 2009.)

4.2 Kosteuden varastoituminen

Rakennuksissa ja rakenteissa kosteus voi esiintyä vetenä, vesihöyrynä tai rakenteisiin sitoutuneena rakennekosteutena. Kuivan huokoisen materiaalin ollessa kontaktissa kostean ilman, veden pinnan tai märän materiaalin kanssa alkaa kuivan materiaalin kosteuspitoisuus nousta eli materiaali kastuu. Vesimolekyylit voivat siirtyä materiaalin sisään eri tavoin. Kosteuden siirtymismenetelmiä tarkastellaan kappaleessa 4.4 Kosteuden siirtyminen. (Lehtoviita ym. 2004, s. 40.)

Rakennusmateriaalit voivat olla hygroskooppisia tai ei-hygroskooppisia. Huokoisten materiaalien huokokset sisältävät ilmaa, joiden kosteuspitoisuus seuraa ympäröivän ilman suhteellista kosteutta, kulloinkin vallitsevissa olosuhteissa. Ympäröivästä ilmasta kosteutta voi siirtyä materiaalin huokosiin hygroskooppisesti. Hygroskooppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä varastoida ja luovuttaa itseensä kosteutta ympäristön kanssa. Kapillaarisesti aktiivisen materiaalin ollessa kosketuksissa vapaan nestemäisen veden pinnan kanssa, materiaaliin pystyy siirtymään vettä kapillaarisesti kapillaarihuokosten välityksellä. (Savolainen 2018, s. 31; Vinha ym. 2005, s. 11.)

Kosteus on huokoisessa materiaalissa olevaa vettä, joka voi olla vapaana tai sitoutuneena nesteinä tai höyrynä. Kosteuden määrän ilmoittamiseen käytetään yleensä paino-osuutta kuivapainosta w [kg/kg] tai tilavuusosuutta u [kg/m³]. (RIL 1984, s. 105.)

Kosteuspitoisuus rakennustekniikassa ilmoitetaan yleensä kahdella eri tavalla. Materiaaliin sitoutunutta kosteuden massaa verrataan kuivan materiaalin tilavuuteen tai massaan. Kappaleeseen sitoutuneen kosteuden massan ja kappaleen kuivan tilavuuden suhteena

$$w = \frac{m_w}{V_d}, \quad (9)$$

missä w on kosteuspitoisuus [kg/m^3],
 m_w on kappaleeseen sitoutuneen kosteuden massa [kg],
 V_d on kappaleen tilavuus kuivana [m^3],

tai kappaleeseen sitoutuneen kosteuden massan ja kuivan kappaleen massan suhteena

$$u = \frac{m_w}{m_d}, \quad (10)$$

missä u on kosteuspitoisuus [kg/kg],
 m_w on kappaleeseen sitoutuneen kosteuden massa [kg] ja
 m_d on kappaleen massa kuivana [kg].

Vesi voi olla sitoutuneena huokoisissa aineissa eri tavoin: kemiallisesti-, kapillaarisesti- ja osmoottisesti sitoutuneena sekä adsorptiolla että höyrynä. Huokoisiin sitoutuvan kosteuden määrä riippuu näiden sidosvoimien suuruudesta. Materiaalit, jotka pystyvät sitomaan ilmasta kosteutta kapillaarikondenssin avulla, johtuen pieninten huokosten täyttymisestä ensin sekä kaarevasta vesipinnasta kapillaari-imussa ovat hygroskooppisia materiaaleja. (RIL 1984, s. 106.)

Kosteus voi varastoitua materiaalin huokoiisiin. Kosteuden varastoituminen huokoisen materiaalin huokoiisiin riippuu ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta ja itse materiaalista. Ympäröivän ilman korkea suhteellinen kosteus voi kasvattaa materiaalin kosteuspitoisuutta w [kg/m^3]. Puu ja betoni voivat varastoida itseensä paljon kosteutta suhteellisen kosteuden ollessa korkealla, kun taas mineraalivilla ei suurillakaan suhteellisen kosteuden arvoilla pysty varastoimaan itseensä kovinkaan paljon kosteutta. Mineraalivilla ei pysty kapillaarisesti imemään vettä itseensä ja hygroskooppisestikin se ei pysty sitomaan kosteutta melkein ollenkaan (RIL 255-1 2014, s. 261).

Hygroσκοoppisen materiaalin ollessa kontaktissa kostean ilman kanssa kosteuspitoisuuseron tasoittuminen aiheuttaa hygroσκοoppista kosteuden varastoitumista materiaalin huokossysteemiin. Materiaalin hygroσκοoppinen alue on suhteellisen kosteuden ollessa välillä 0-98 %, kun materiaalia ympäröi kosteutta sisältävää ilmaa. Suhteellisen kosteuden 98-100 % alueella materiaali voi imeä itseensä vettä kapillaarisesti ja täyttää huokossysteemin, jos se on kosketuksessa vapaan veden kanssa. (the Wit 2009, s. 87.)

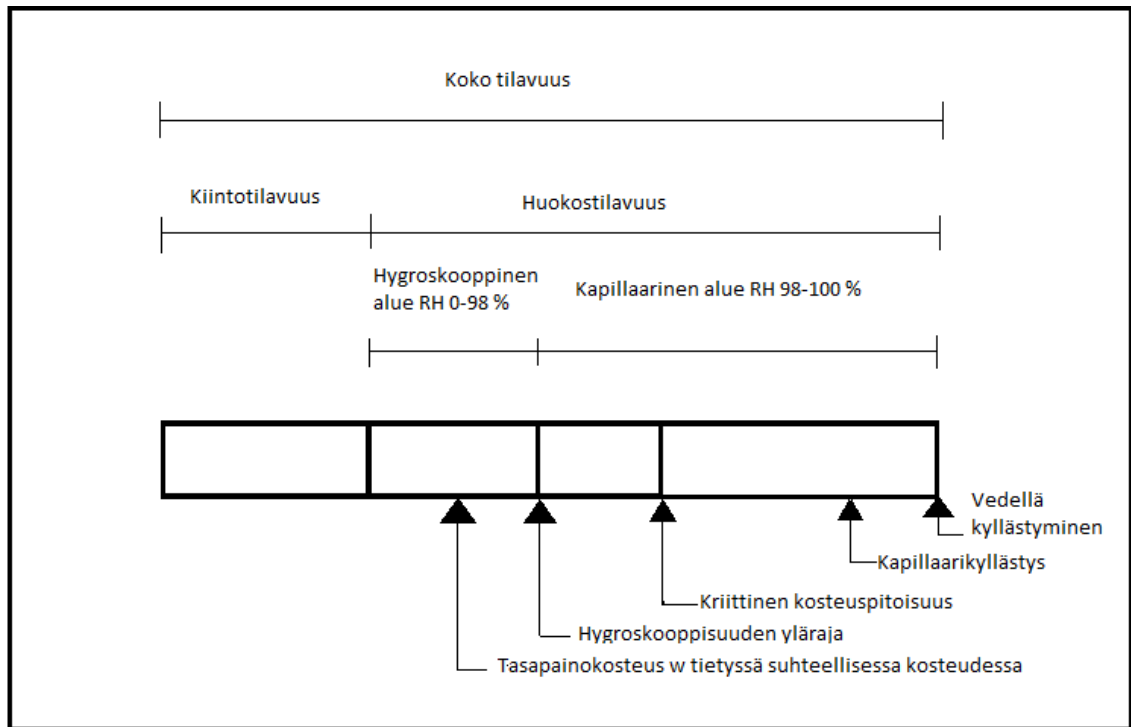
Hygroσκοoppisen materiaalin sisältämä kosteuden/ veden määrä w [kg/m³] ilmaistaan huokosilman kosteuden (ϕ) funktiona tasapainokosteuskäyrällä

$$w = w(\phi), \quad (11)$$

missä w on kosteuden/ veden määrä [kg/m³] ja
 ϕ on huokosilman suhteellinen kosteus.

Tasapainokosteuskäyrä on materiaalikohtainen. Tasapainokosteuskäyrä kertoo kosteusmäärän, jonka materiaali sitoo itseensä tietyssä lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa. Tasapainokosteuskäyrällä pitää huomata, että materiaalin kyllästyskosteus w_f ei ole materiaalin maksimikosteus w_{max} . Materiaalin maksimikosteuden w_{max} määrää materiaalin huokoisuus. Kyllästyskosteus w_f on materiaalikohtainen parametri. Materiaalin kapillaarinen kyllästyskosteus voidaan ylittää paineen tai lämpötilan vaikutuksesta. Huokoisen materiaalin ollessa kosketuksissa vapaaseen veteen materiaali pystyy imemään huokossysteemiinsä vettä ja täyttämään huokokset. Kriittinen kosteuspitoisuus on alhaisin kosteuspitoisuus, jolla voidaan olettaa, että vettä siirtyy jatkuvasti kapillaarisesti materiaaliin. Kriittisen kosteuspitoisuuden alapuolella vesihöyryn siirtyminen on pääroolissa hygroσκοoppisesti, kun taas sen yläpuolella vapaan veden siirtyminen kapillaarisesti dominoi. Kriittinen kosteuspitoisuus on esitetty Kuvassa 3. Kriittinen kosteuspitoisuus on suurempi kuin maksimaalinen hygroσκοoppinen kosteuspitoisuus eli 98 %. (the Wit 2009, s. 87; Künzelt 1995, s. 7.)

Kuvassa 3 esitetään materiaalin hygroskooppinen ja kapillaarinen alue sekä havainnollistetaan materiaalin kostumisen eri vaiheita.



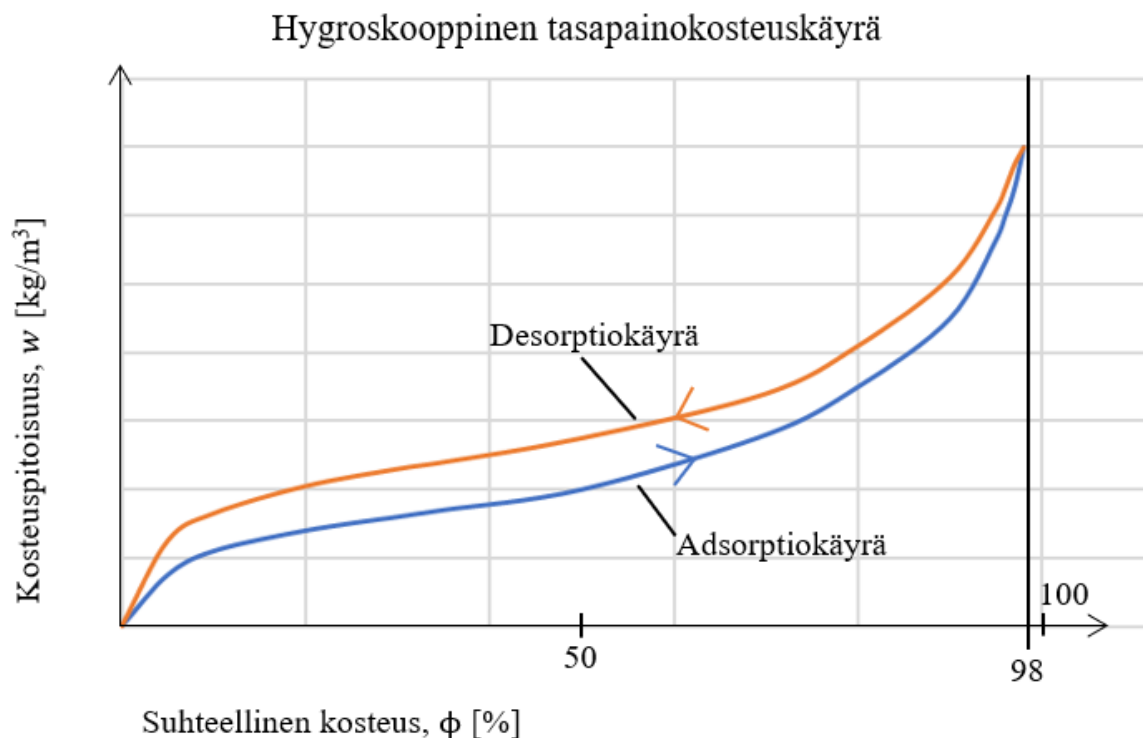
Kuva 3. Materiaalin hygroskooppinen ja kapillaarinen kostuminen (mukaillen Björkholz 1987).

Tasapainokosteus voidaan jakaa kahteen eri muotoon: hygroskooppiseen ja kapillaariseen tasapainokosteuteen. Hygroskooppinen tasapainokosteus tarkoittaa materiaalin kosteuden tasapainoa kontaktista olevan ilman kosteuden kanssa tietyssä ympäristön lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa. Kapillaarinen tasapainokosteus tarkoittaa materiaalin kosteuden tasapainoa kosketuksessa olevan vapaan veden tai toisen kapillaarisen materiaalin kanssa. (RIL 1984, s. 107.)

Hygroskooppinen kosteus on ilmasta materiaaliin siirtynyttä kosteutta. Hygroskooppisen materiaalin kosteuspitoisuus seuraa sen kontaktissa olevan ilman suhteellista kosteuspitoisuutta ja pyrkii tasoittumaan. Tällöin muun muassa materiaalin lämmönjohtavuus muuttuu ilmakehän kosteuden mukaan. Kun materiaali ei sido eikä luovuta kosteutta ympäristönsä kanssa, on materiaali saavuttanut kosteuden suhteen tasapainotilan, jota sanotaan hygroskooppiseksi kosteustasapainoksi. Ei-

hygroσκοoppinen materiaali pysyy kuivana kontaktissa kosteaan ilmaan ja ilman kosteuspitoisuus ei vaikuta merkittävästi ei-hygroσκοoppisen materiaalin materiaaliominaisuuksiin. (Sisäilmayhdistys ry. 2020.)

Hygroσκοoppinen tasapainokosteus voi vaihdella sitä ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona sekä lisäksi siten, miten tasapainokosteus on saavutettu (Time 1998, s. 10). Tasapainokosteus voidaan saavuttaa adsorptiolla tai desorptiolla. Adsorption ja desorption muutosnopeus myös vaikuttaa tasapainokosteuteen. Adsorptiossa materiaali absorboi kosteutta ympäröivästä ilmasta eli materiaali kostuu. Desorptiossa rakenne luovuttaa kosteutta ympäröivään ilmaan eli rakenne kuivuu. Tasapainokäyrien poikkeavuutta toisistaan kutsutaan hystereesiksi. Kuvassa 4 on esitetty periaatekuva hygroσκοoppisesta tasapainokosteuskäyrästä. Adsorptio- ja desorptionopeus on tärkeä rakenteen kosteusteknistä käyttäytymistä kuvaava parametri. Sorptio on kosteuden liikkumista rakenteen sisällä. Sorptionopeus riippuu materiaalien suhteellisen kosteuden erosta, materiaalista, sen koosta ja lämpötilasta sekä kosteuden konvektiosta rakenteen pinnalla. (Lehtoviita ym. 2004, s. 36; Time 1998, s. 11-12.)



Kuva 4. Hygroσκοoppinen tasapainokosteuskäyrä (mukaiillen RIL 255-1-2014, s. 349).

Jokaisella materiaalilla on kaksi omantyylistä tasapainokosteuskäyrää: kastumisvaihe- ja kuivumisvaiheikäyrä. Materiaaleilla on suurempi kosteuspitoisuus kuivumisvaiheessa, sekä matalissa lämpötiloissa materiaali sitoo enemmän vettä kuin korkeissa lämpötiloissa (Sisäilmayhdistys ry. 2020). Lämpötilan muutoksen vaikutus tasapainokosteuteen on suhteellisen pieni (Vinha ym. 2005, s. 3). Veden kapillaarinen adsorptio materiaaliin on huomattavasti nopeampaa kuin materiaalin kuivuminen sen jälkeen, kun uuden kosteuden kulkeutuminen materiaalin on pysähtynyt (WUFI 2009).

Materiaalin varastoima kosteus riippuu kosteushistoriasta, koska kastumisen ja kuivumisen tasapainokäyrät eroavat hystereesin verran toisistaan. Künzelin mukaan (Künzel 1995, s. 7) adsorption ja desorption eroavaisuus eli hystereesi ei ole merkittävä useimmilla rakennusmateriaaleilla, joten adsorption tasapainokäyrää voidaan käyttää yksistään kuvaamaan materiaalien kosteuden varastointikykyä. Jos kuitenkin jollakin materiaalilla hystereesi on suurta, niin riittävän tarkka approksimaatio saavutetaan, kun käytetään adsorption ja desorption tasapainokäyrien keskiarvoa. (Künzel 1995, s. 7.)

Sitoutuneen veden höyrynpaine on pienempi kuin vapaalla vedellä johtuen kapillaarisen tasapainokosteuden sitoutumisvoimista. Tätä syntyvää alipainetta kutsutaan huokosalipaineeksi. (RIL 1984, s. 107.)

Kapillaarisella alueella käytetään omaa kapillaarista tasapainokosteuskäyrää, koska huokosilman suhteellinen kosteus on koko ajan 100 % lähettyvillä ja täten hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä ei pysty kuvaamaan ongelmanluonnetta selkeästi. Kapillaarisessa tasapainokosteuskäyrässä kosteuspitoisuus esitetään yleensä huokosalipaineen funktiona. (RIL 255-1 2014, s. 350.)

Nestemuodossa oleva vesi liikkuu huokosissa materiaaleissa painovoiman sekä kapillaarisen imuvoiman aiheuttamana. Kapillaarinen kosteus on materiaaliin huokosalipaineen vaikutuksesta imeytynyttä vettä, materiaalin ollessa kontaktissa veteen tai toiseen kapillaarisella alueella olevaan materiaaliin. Kapillaarinen kosteustasapaino saavutetaan, kun kosteus on siirtynyt potentiaalille, jossa huokosalipaine ja maan vetovoima ovat tasapainossa keskenään eli yhtä suuret. Kosteustasapaino voi myös muodostua seinärakenteeseen, jossa rakenteen pinnasta ilmaan haihtuva kosteus vaikuttaa

osaltaan siihen, miten korkealle kosteus seinärakenteessa lopulta nousee. Kyseessä on transientti tasapainotilanne kapillaarisesti siirtyvän ja haihtumalla poistuvan kosteuden välillä. Kapillaarinen kosteuden imeytyminen ja liikkuminen riippuvat materiaalin huokosjakaumasta. Pienihuokoisempi materiaali pystyy imemään kosteutta kapillaarisesti enemmän. Materiaali käyttäytyy kapillaarisesti, kun sen huokosilman suhteellinen kosteus on välillä 98-100 %. Tällöin materiaali voi imeä itseensä vettä ja täyttää huokossysteemin, jos se on kosketuksissa vapaan veden kanssa. Rakenteisiin kosketuksissa olevan ilman kosteudella on myös suuri merkitys. Jos ilman suhteellinen kosteus on lähellä 100 %, niin ilma ei voi vastaanottaa haihtuvaa kosteutta vaan kapillaarinen veden siirtyminen rakenteessa jatkuu. (Sisäilmayhdistys ry. 2020.)

Monet rakennusmateriaalit ovat huokoisia ja ne esimerkiksi sitoivat vettä kapillaari-ilmion avulla. Kahden huokoisen materiaalin kontaktissa vesi siirtyy suurempi huokoisesta materiaalista pienempi huokoiseen materiaaliin kapillaari-imun avulla. Tämä johtuu siitä, että kapillaari-imu on voimakkaampaa pienemmissä huokoisissa. Esimerkiksi puun ja betonin ollessa kontaktissa keskenään, puu imee kapillaari-imun avulla vettä betonista, koska puulla on pienempi huokoskoko. Huokoisten materiaalien suhteellisen kosteuden ollessa yli 90 %, kapillaari-imulla on suuri vaikutus materiaalien kosteuskäyttäytymiseen. (the Wit 2009, s. 84-85.)

Materiaalin kosteuskapasiteetti kuvaa materiaalin kykyä varastoida ja luovuttaa kosteutta kosteudensiirtymisessä samalla tavalla kuin ominaislämpökapasiteetti kuvaa lämmön varastoimis- ja luovutuskykyä lämmönsiirtymisessä. Materiaalin kosteuskapasiteetillä on suuri merkitys rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. (Siikanen 2012, s. 10.)

Kosteuskapasiteetti on materiaalikohtainen ominaisuus. Kosteuskapasiteetti on materiaalin kosteudenpitoisuuden suhde suhteelliseen kosteuteen

$$\xi = \frac{dw}{d\phi}, \quad (12)$$

missä ξ on kosteuskapasiteetti [kg/m^3],
 w on kosteuspitoisuus [kg/m^3] ja
 ϕ on suhteellinen kosteus [-].

Seinien kosteuskapasiteetti tasaa vesihöyryn muodossa olevan kosteuden kulkeutumista seinän läpi, sisälle ja ulos sekä vähentää samalla kosteusvaurion syntymisen todennäköisyyttä. Pintaverhouksen kosteuskapasiteetti saattaa vaikuttaa merkittävästi huoneilman kosteuspitoisuuteen, koska jo esimerkiksi vähäinenkin puuverhoilu tasaa merkittävästi huoneilman kosteushuippuja. Puuverhouksen kosteuskapasiteetti toimii näin vain, jos puuta ei ole pintakäsitelty vesihöyryn liikkumista estävällä tiiviillä kalvolla esimerkiksi vesihöyryä läpäisemättömällä maalilla. (Siikanen 2012, s. 14.)

Rakenteen sisältäessä paljon hygroskooppista kosteutta sitovia materiaaleja, rakenne voi varastoida ilmasta paljon kosteutta ilman rakenteen toimivuuden merkittävää muutosta (Pitkäranta 2016, s. 102). Rakenteiden suuren kosteuskapasiteetin merkitys kosteusvaurioiden synnyn ehkäisemiseksi korostuu.

Kosteuspitoisuus rakenteen sisällä on tärkeä varmentaa sellaiseksi, jolla haitallista kondensoitumista ei pääse tapahtumaan. Kosteus voi vaikuttaa rakennusosien ja rakennusmateriaalien käyttökelpoisuuteen ja kestävyYTEEN. Kosteuspitoisuus vaikuttaa myös rakenteen ja materiaalien lämmöneristyskykyyn. Materiaalien korkea kosteuspitoisuus kasvattaa hygroskooppisten materiaalien lämmönjohtavuuksia. Korkea rakennusmateriaalien kosteuspitoisuus toimii hyvin homeen ja muiden mikrobien kasvualustana ja tämä altistaa homevaurion synnylle. Kosteuspitoisuuden nopeat muutokset aiheuttavat rakennusmateriaalien halkeilua ja paisumista, mikä heikentää rakenteen kantokykyä. (WUFI 2009.)

4.3 Lämmön siirtyminen

Lämpö on lämpötilaerosta aiheutuvaa energian siirtymistä korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan termodynamiikan nollannen pääsäännön mukaisesti. Tästä siirtyneestä energiamäärästä käytetään nimitystä lämpömäärä [J]. Lämpömäärä eli lämpöenergia on energian määrä, joka sitoutuu tai poistuu kappaleesta. Kappaleen lämpömäärän vaihtelu vastaanottamalla tai luovuttamalla energiaa muuttaa kappaleen lämpötilaa kyseisen verran. Lämpömäärä on lämpöön liittyvä suure, kun taas lämpö on käsitteenä ilmiö. (the Wit 2009, s. 9.)

Lämmönsiirtymistä tapahtuu rakenteissa kolmella tavalla: Johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Lämpö siirtyy aina lämpimämmästä kylmempään kappaleeseen. Lämpövirran suuruus riippuu tarkasteltavien pintojen lämpötilaeroista, altistuneesta pinta-alasta sekä materiaalien ja aineiden ominaisuuksista tarkasteltavien pintojen välillä.

Johtuminen eli konduktio on lämmönsiirtymistä aineen sisällä. Konduktiossa lämpö siirtyy kiinteissä aineissa ja nesteissä aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan pyrkien tasoittamaan lämpötilaeroja. Konduktiossa atomien liike-energia siirtyy vierekkäisestä molekyylistä toiseen sisäisen värähtelyn vaikutuksesta. Johtuminen on ainoa lämpöenergian siirtymismuoto kiinteissä aineissa. (Siikanen 2012, s. 5.)

Homogeenisen ja isotrooppisen rakenteen sisällä lämpö siirtyy lämpimämmästä osasta kylmempään johtumalla Fourierin lain mukaisesti (13). Fourierin lain avulla lämpövirran tiheys q [W/m²] ilmaistaan

$$q = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (13)$$

missä q on lämpövirran tiheys [W/m²],

λ on lämmönjohtavuus [W/(mK)],

∇T on lämpötilagradientti [K/m],

T on lämpötila [K] ja

x, y, z ovat lämpövirran skalaariset suuntakoordinaatit.

Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys riippuu materiaalin tai väliaineen lämmönjohtavuudesta ja lämpötilagradientista. Gradientti on potentiaaliero jaettuna etäisyydellä. Lämpövirran tiheyden suunta on korkeammasta lämpötilasta matalampaan, mistä johtuu yhtälön miinusmerkki.

Yksiulotteisessa tapauksessa suoritetaan dimensioireduktio vastaamaan ongelman luonnetta. Lämpövirta pysyy koko rakenteen läpi vakiona. Lämpötilajakauman ollessa lineaarinen jatkuvuustilassa aina yhden materiaalin paksuuden yli aivan kuin Kuvassa 5 saadaan lämpövirrantiheys muotoon

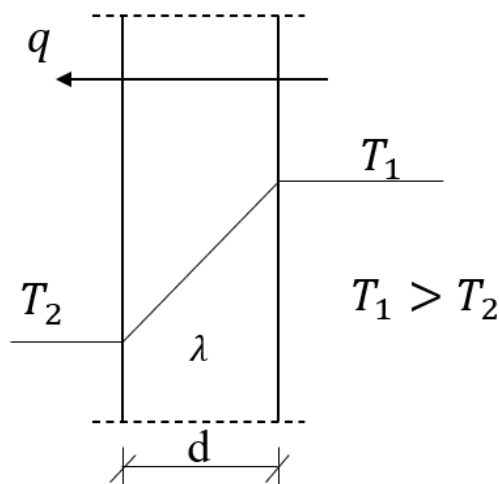
$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d}, \quad (14)$$

missä q on lämpövirran tiheys [W/m^2],

T_1 & T_2 ovat väliaineen lämpötiloja rakenteen eri puolilla $T_1 > T_2$ [K],

λ on materiaalin lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$] ja

d on materiaalikerroksen paksuus [m].



Kuva 5. Lämmön johtuminen ainekerroksen läpi lämpötilajakauman ollessa lineaarinen (mukaillen Vinha 2010, s. 2).

Lämpövirta Q_v [W] tietyn kokoisen alueen läpi voidaan laskea lämpövirran tiheyden avulla 1D-tapauksessa kaavalla

$$Q_v = qA, \quad (15)$$

missä Q_v on lämpövirta [W],
 q on lämpövirran tiheys [W/m²] ja
 A on tutkittavan rakenteen pinta-ala [m²].

Lämpövastus R [m²K/W] on materiaalin ominaisuus vastustamaan materiaalin läpi kulkevaa lämpövirtaa. Lämmönvastus ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevan lämpötilaeron ja ainekerroksen paksuuden yli kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen. Lämmönvastus on lämpöominaisuus ja lämpötilaeron mitta, jolla materiaali vastustaa lämpövirtaa. Rakenteen lämpövastus saadaan summaamalla materiaalikerrosten ja pintojen lämpövastukset yhteen

$$R_{kok} = \sum_{i=1}^n \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{si} + R_{se}, \quad (16)$$

missä R_{kok} on rakenteen materiaalikerrosten ja pintojen lämpövastuksien summa [m²K/W],
 λ on lämmönjohtavuus [W/(mK)],
 d on materiaalikerroksen paksuus [m],
 R_{si} on sisäpinnan pintavastus [m²K/W] ja
 R_{se} on ulkopinnan pintavastus [m²K/W].

Pintojen lämpövastukset [m²K/W] ilmoittavat rakennusosan pinnan ja ympäristön välisen rajakerroksen lämpövastuksen. Pinnan lämpövastukset kuvaavat rakenteen pinnan lähelle muodostuvaa ohutta hitaasti liikkuvan ilman muodostamaa lämpövastusta. Pintavastukset riippuvat ilman lämpövirran suunnasta pinnalla, ympäröivästä säteilystä sekä onko kyseessä sisä- vai ulkopinta. Ulkopinnan pintavastukseen vaikuttaa myös pinnansuuntainen tuulen nopeus. Pinnansuuntaisen tuulen nopeuden kasvaessa pintavastus pienenee, koska konvektio on voimakkaampaa ja täten kuljettaa ilmaa nopeampaa pois. (Vinha 2010, s. 10.)

Rakennuksen julkisivu on lämpökosketuksessa ympäristön kanssa konvektion ja pitkäaaltoisen säteilyn avulla, missä lämpö siirtyy rakennuksen pinnoilta ympäristöön.

Sisä- ja ulkopinnan pintavastukset voidaan määrittää konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimien avulla seuraavasti:

$$R_{si} = \frac{1}{\alpha_{si}} = \frac{1}{h_i + \alpha_{s,i}}, \quad (17)$$

$$R_{se} = \frac{1}{\alpha_{se}} = \frac{1}{h_e + \alpha_{s,e}}, \quad (18)$$

missä R_{si} on sisäpinnan pintavastus [$\text{m}^2\text{K/W}$],
 R_{se} on ulkopinnan pintavastus [$\text{m}^2\text{K/W}$],
 α_s on säteilyn lämmönsiirtokerroin [$\text{W/m}^2\text{K}$] ja
 h on konvektion lämmönsiirtokerroin [$\text{W/m}^2\text{K}$].

Säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokertoimissa alaindeksi i viittaa sisäpuoleen ja e ulkopuoleen. Säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokertoimille löytyy kirjallisuudesta kaavoja ja vakioarvoja.

Taulukossa 1 on esitetty standardissa SFS-EN ISO 6946 2008 mainittuja sisä- ja ulkopintojen pintavastuksia. Taulukossa 1 mainittuja pintavastuksia saa käyttää vain kontaktissa ilman kanssa. Pintavastukset on määritetty käyttämällä harmaan kappaleen emissiivisyytenä $\varepsilon = 0,9$, sisälämpötilana 20 °C ja ulkolämpötilana 10 °C sekä ulkopinnansuuntaisena tuulen nopeutena $v = 4\text{ m/s}$.

Taulukko 1. Sisä- ja ulkopintojen pintavastuksien likiarvoja.

| Tavanomaisia pintavastuksia | | | |
|--|--------------------|------------|----------|
| Pintavastus [$\text{m}^2\text{K/W}$] | Lämpövirran suunta | | |
| | ylöspäin | vaakasuora | alaspäin |
| R_{si} | 0,10 | 0,13 | 0,17 |
| R_{se} | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

Tuulettumattomille, hiukan tuulettuville ja hyvin tuulettuville ilmapäleille määritellään myös lämpövastukset. Ilmapäleille on määritelty tuulettuvuuden perusteella lämpövastuksia standardissa SFS-EN ISO 6946:2017 kappaleessa 6.9 Ilmakerrosten lämpövastukset. Tuulettumattomille eli suljetuille ilmapäleille konvektiovirtaus ei pääse ulkopuolelta tapahtumaan. Suljetuille ilmapäleillä myös yleensä määritetään lämmönvastusarvoja, joissa on otettu huomioon kaikki lämmönsiirtymismuotojen vaikutukset. Kun ilmapäliin muodostuu sisäinen konvektiovirtaus, niin ilmapälin lämmönvastus ei enää kovinkaan paljon kasva. Tuulettumattoman ilmakerroksen lämpövastus on suurempi kuin tuulettuvan ilmakerroksen lämpövastus, johtuen tuulettuvan ilmakerroksen sisältämän lämmön siirtymisestä konvektion avulla pois rakenteesta (Vinha 2010, s. 11-12).

Rakenteisiin ilmapäli on suunniteltu kosteuden poisjohtamiseksi rakenteen sisäpinnalta. Oikeanlaisen ilmanvaihdon ilmapäliissä pitäisi parantaa rakenteen kuivumista. Kosteusteknisesti toimivassa rakenteessa ilmapäli on eristekerroksen ulkopuolella. Huonosti toteutetussa rakenteessa ilmanvaihto voi tapahtua eristekerroksen sisäpuolen kautta eli rakenteen lämpimältä puolelta, jolloin U-arvo heikkenee merkittävästi, koska lämpötilaero on suuri ilman ja rakenteen välillä, jolloin ilmapärtaus kuljettaa lämpöä pois konvektion avulla. (the Wit 2009, s. 144-145.)

Puutteellinen tuuletus ulkoilmaan sekä väärin toteutettu rakenne voi aiheuttaa ilmapärtauksen eristekerroksen ympäri, jolloin ilmapärtaus poistaa lämmöneristekerroksen eristävyyskyvyn. Tällöin rakenteen U-arvo heikkenee eli lukuna suurenee merkittävästi. Lisäksi rakenne altistuu kastepisteen alittamiselle, joka mahdollistaa kosteuden tiivistymisen eristekerroksen ympärille. (the Wit 2009, s. 145.)

Lämmönsiirtokerroin α [W/m²K] kuvaa kuinka paljon tehoa siirtyy pinta-alaa kohti, kun pinnan ja rakenteen välillä on lämpötilaero

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} = \frac{q}{T_1 - T_2}, \quad (19)$$

missä α on lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],
 λ on lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$],
 d on materiaalikerroksen paksuus [m],
 q on lämpövirran tiheys [W/m^2] ja
 T_1 & T_2 ovat väliaineen lämpötiloja rakenteen eri puolilla $T_1 > T_2$ [K].

Lämmönjohtavuus λ [W/mK] kuvaa materiaalin kykyä johtaa lämpöä itsensä läpi. Rakennusmateriaalien lämmönjohtavuus on tehollinen arvo, joka sisältää kaikkien lämmönsiirtymismuotojen vaikutukset. Yleensä kaikki tärkeimmät lämmönsiirtymismuodot eli konduktio, konvektio ja säteily otetaan huomioon materiaaleille määritetyissä lämmönjohtavuusarvoissa (Vinha ym. 2005, s. 22). Rakennusfysiikassa tavoitellaan mahdollisimman pientä lämmönjohtavuudenarvoa eristäville materiaaleille, mikä takaa rakenteen hyvän lämmöneristyskyvyn ja vähentää rakennuksen energiankulutusta. Lämmönjohtavuus voidaan lausua Fourierin lain (13) avulla: Lämmönjohtavuus λ ilmoittaa lämpövirran tiheyden ja lämpötila gradientin välisen riippuvuuden pituusyksikön paksuisen rakenteen läpi jatkuvuustilassa, kun lämpötilaero pintojen välillä on yksikön suuruinen. Materiaalin lämmönjohtavuus ei ole vakio, vaan muuttuu merkittävästi erityisesti materiaalin kosteuspitoisuuden, lämpötilan ja tiheyden mukaan (Vinha ym. 2005, s. 23).

Materiaalin lämmönjohtavuuteen vaikuttaa merkittävimmin hygroskooppisilla materiaaleilla huokosilman suhteellinen kosteudenpitoisuus. Huokosilman suhteellisen kosteuspitoisuuden ylittäessä 50 % hygroskooppisella materiaalilla lämmönjohtavuus kasvaa merkittävästi. Ei-hygroskooppisilla materiaaleilla suhteellisen kosteuden muutoksella ei ole vaikutusta materiaalien lämmönjohtavuuden arvoihin, koska materiaalit eivät ime itseensä kosteutta. Materiaalin kosteuspitoisuuden w kasvulla on merkittävä vaikutus materiaalin lämmönjohtavuuteen. Lämmönjohtavuus on riippuvainen isotermien ja suhteellisen kosteuden muutoksesta: suhteellisen kosteuden kasvu isotermeillä kasvattaa lämmönjohtavuuden arvoa. Materiaalien lämmönjohtavuuteen vaikuttaa myös materiaalin rakenne, tiheys ja huokoisuus. Hygroskooppisilla materiaaleilla suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kasvu vaikuttavat suurentavasti lämmönjohtavuuden arvoihin. (Vinha 2010, s. 3-5; Vinha ym. 2005, s. 3.)

Materiaalien lämmönjohtavuus 20 °C lämpötilassa on suurin piirtein 10-15 % korkeampi kuin -10 °C lämpötilassa. Simuloitaessa laajalla lämpötila-alueella, lämmönjohtavuuden muuttuminen lämpötilan funktiona on tärkeää ottaa huomioon, jotta tulokset olisivat mahdollisimman luotettavia ja laadukkaita. Hygroskooppisilla materiaaleilla 97 %:n suhteellisessa kosteudessa ilmastoitujen koekappaleiden lämmönjohtavuudelle on tutkimuksissa mitattu 10-20 % suurempia lämmönjohtavuuden arvoja kuin kuivilla koekappaleilla. (Vinha ym. 2005, s. 96.)

Tavanomaisten lämmöneristeiden pieni kokonaislämmönjohtavuus johtuu siitä, että eristeet sisältävät paljon ilmaa ja ilman lämmönjohtavuus on alhainen. Esimerkiksi mineraalivillaeristeiden tilavuudesta noin 92-99 % on ilmaa. Eristeen pienet ilmahuokokset pyrkivät pitämään ilman paikallaan ja näin pienentämään huokosten reunojen välisiä lämpötilaeroja. Näin konvektion ja säteilyn vaikutus saadaan minimoitua eristeen sisällä. (Vinha 2010, s. 6.)

Betonin lämmönjohtavuus kasvaa betonin raudotteiden ja tiheyden kasvaessa. Lämmönjohtavuus riippuu myös kosteuspitoisuudesta ja lämpötilasta. Betonin kosteuspitoisuuden kasvu ja lämpötilan nousu vaikuttavat suurentavasti lämmönjohtavuuden arvoon. Betonin lämmönjohtavuus vaihtelee kyseisistä tekijöistä riippuen välillä 1,0-3,0 [W/mK]. (RIL 255-1 2014, s. 275.)

Lämmönläpäisykertoimen eli U-arvon [W/m²K] laskennassa käytetään materiaalien lämmönjohtavuuksina lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja λ_u [W/mK]. U-arvo kuvaa rakennusosien lämmöneristyskykyä. Mitä pienempi U-arvo on, sitä parempi on rakenteen lämmöneristyskyky. U-arvo on seinän kokonaislämpövastuksen ja pintavastuksien summan käänteisarvo

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{kok} + R_{se}}, \quad (20)$$

missä U on lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],
 R_{si} on sisäpinnan pintavastus [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$],
 R_{kok} on seinän materiaalikerroksien kokonaislämpövastus [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] ja
 R_{se} on ulkopinnan pintavastus [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$].

Suunnitteluarvo poikkeaa keskimääräisestä mitatusta lämmönjohtavuusarvosta λ_{10} siten, että siinä on huomioitu lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutoksien vaikutukset. Lisäksi suunnitteluarvossa on huomioitu materiaalin vanhenemisen tuomat heikennysvaikutukset. (Vinha 2010, s. 6.)

Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot λ_u on määritetty erilaisilla tuotestandardeilla ja eurooppalaisilla teknisillä hyväksynnöillä. Lämmöneristeet jaetaan kolmeen luokkaan, joiden avulla määritellään niille lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo. (Vinha 2010, s. 6.)

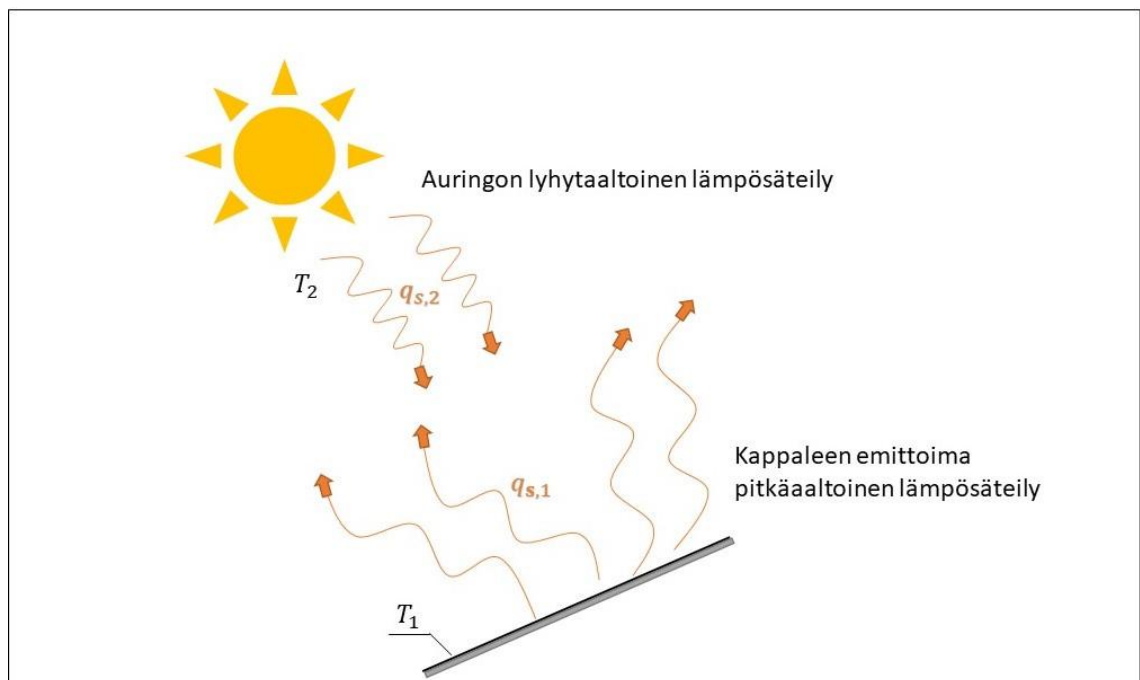
Säteilyssä lämpöenergiaa siirtyy poikittaisena aaltoliikkeenä valon nopeudella. Kaikki absoluuttisen nollapisteen yläpuolella olevat kappaleet säteilevät energiaa ympäristöönsä. Säteily ei tarvitse väliainetta siirtyäkseen. Elektromagneettisten aaltojen emissio ja absorptio aiheuttavat lämmönsiirtymisen säteilynä (Siikanen 2012, s. 5). Usein rakennusfysikaalisissa laskelmissa käytetään harmaan pinnan emissiivisyyttä, jossa emissiivisyys oletetaan aallonpituudesta riippumattomaksi ja säteilyn oletetaan emittoituvan diffuusina säteilynä tasaisesti kaikkiin suuntiin (RIL 1984, s. 43). Emissiivisyys kertoo kuinka paljon materiaalin pinta voi emittoida lämpösäteilyä. Emissiivisyyden arvo vaihtelee nollan ja yhden välillä, missä arvo 1 tarkoittaa mustankappaleen emissiivisyyttä eli kappale absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn.

Säteilemällä siirtyvän lämpövirran suuruus riippuu voimakkaasti lämpötilaeroista kappaleiden pintojen välillä. Lämmönsiirtymistä säteilemällä kuvaa yhtälö

$$q_s = \varepsilon \sigma (T_{ext}^4 - T^4), \quad (21)$$

missä q_s on säteilemällä siirtyvä lämpövirta [W/m^2],
 ε on emissiivisyys [-],
 σ on Stefan-Boltzmanin vakio [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$],
 T_{ext} on ympäröivän aineen lämpötila [K] ja
 T on kiinteän pinnan lämpötila [K].

Säteilylain neljäs potenssi lämpötilalle T tekee lämpövuolle q annettavasta säteilyreunaehdosta q_s epälineaarisen. Rakennuksille säteilyn voimakkuus on suurinta julkisivuille, joihin auringon lyhytaaltainen säteily ja muiden kappaleiden lähettämä pitkäaaltainen säteily osuvat ja lämmittävät julkisivua. Kuvassa 6 on esitetty auringon ja kappaleen emittoima lämpösäteily. Säteilyn kohdatessa materiaalin osa siitä heijastuu takaisin, osa absorboituu materiaaliin ja osa menee materiaalista läpi (Vinha 2010, s. 68).



Kuva 6. Lämmön siirtyminen säteilemällä (mukaillen Vinha 2010, s. 1).

Pilvettömänä yönä julkisivurakenteet säteilevät pitkäaaltoista lämpösäteilyä avaruuteen, koska yläilmakehän ja avaruuden lämpötila on matalampi kuin julkisivurakenteen ja pilvet eivät ole estämässä lämpösäteilyä. Tällöin julkisivurakenteen luovuttama lämpösäteily on suurempaan kuin absorboitunut lämpösäteily. Julkisivurakenteen

emittoiman lämpösäteilyn seurauksena julkisivurakenteen ulkopintalämpötila voi laskea vallitsevan ulkolämpötilan kastepistettä alhaisemmaksi, jolloin ulkoilman kosteus voi tiivistyä julkisivurakenteen kylmemmälle pinnalla ja kuuraantua.

Kokonaislämmönsiirtokerroin koostuu konduktion, konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimesta. Konduktiolla siirtyvän lämpövirran osuus on yleensä pieni verrattuna säteilemällä ja konvektiolla tapahtuvaan lämpövirtaan, joten se jätetään yleensä rakennusfysikaalisista tarkasteluista huomioimatta. Vapaa konvektio ja säteily ovat dominoivia lämmönsiirtymistapoja ilmarakojen ja -välien eri puolien välillä. Konvektion ja säteilyn yhdistetty lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua kaavasta

$$\alpha = h + K * \alpha_s, \quad (22)$$

missä α on konvektion ja säteilyn yhdistetty lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],
 h on konvektion lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],
 α_s on säteilyn lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] ja
 K on korjauskerroin [-].

Korjauskerroin K määritellään

$$K = (T_p - T)/(T_p - T_s), \quad (23)$$

missä K on korjauskerroin [-],
 T_p on ko. pinnan lämpötila [K],
 T on ko. pintaan säteilevien pintojen lämpötilan keskiarvo [K] ja
 T_s on sisälämpötila [K].

Mikäli tarkasteltavaan pintaan säteilevien pintojen lämpötila ei poikkea ympäröivän ilman lämpötilasta, niin kerroin $K=1$. Jos ympäröivien pintojen lämpötila poikkeaa ilman lämpötilasta, niin säteilyn lämmönsiirtokerrointa korjataan kertoimella $K \neq 1$ ylemmän kaavan mukaisesti. (Vinha 2010, s. 78; RIL 155, s. 46.)

Konvektion ja säteilyn yhdistetty lämmönsiirtokerroin on myös riippuvainen konvektion- ja säteilyn lämpövirtojen suunnista. Rakenteen säteillessä pitkäaaltoista lämpösäteilyä öisin avaruuteen, ulkopintalämpötila laskee ulkoilman lämpötilan alapuolelle. Tällöin konvektion ja säteilyn lämpövirrat kulkevat rakenteen pinnalla eri suuntiin. (WUFI 2009.)

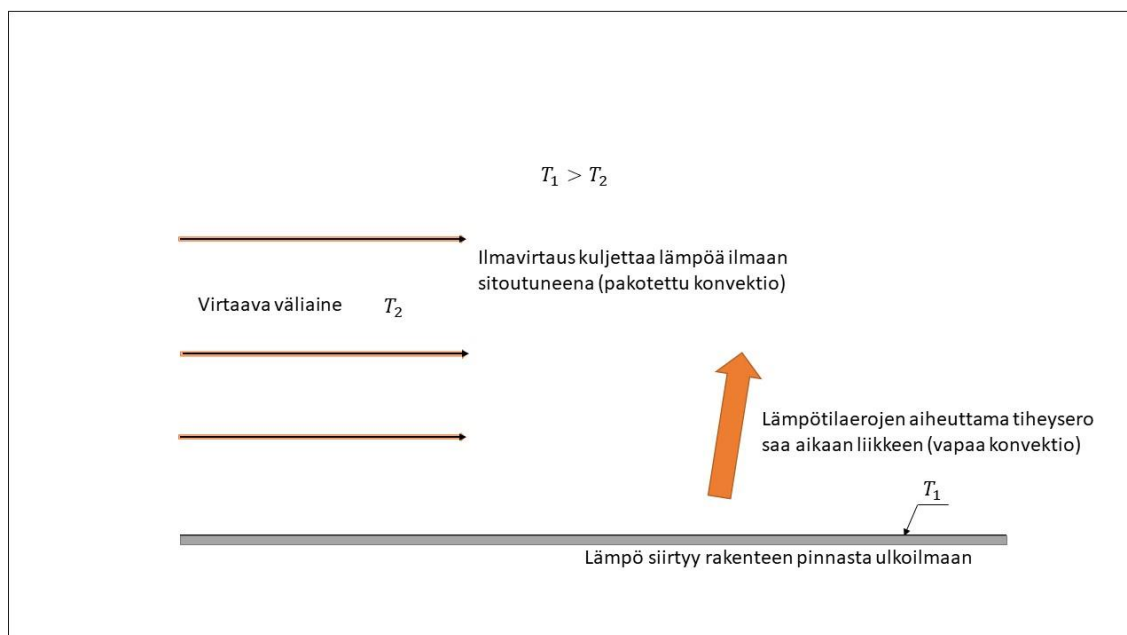
Yhdistetylle säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokertoimelle voidaan käyttää vakioarvoja ulko- ja sisäpinnalla, koska ilmakerroksen lämpövastus on minimaalinen verrattuna rakenteen materiaalikerroksien muodostamaan lämpövastukseen. Taulukossa 2 on esitetty yhdistetyn lämmönsiirtokertoimen arvoja sisä- ja ulkopinnalle. (WUFI 2009.)

Taulukko 2. Yhdistetyt konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimet rakenteen sisä- ja ulkopinnoille (WUFI 2009).

| Rakenteen pinta | Konvektion ja säteilyn yhdistetty lämmönsiirtokerroin α [W/m ² K] |
|-----------------|---|
| Ulkopinta | 17 |
| Sisäpinta | 8 |

Simulointimallia rakennettaessa konvektiiviset lämmönsiirtymiskertoimet annetaan sisä- ja ulkopinnalle sekä mahdollisille ilmaraoille konvektiivisen lämpövirran tiheyttä määrittäessä. Konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin riippuu aineen ominaisuuksista, virtauksen luonteesta ja olosuhteista sekä pinnan karheudesta. Lämmönsiirtymiskerroin kuvaa kuinka paljon tehoa siirtyy pinta-alan läpi, kun rakenteen pinnan ja väliaineen välillä on lämpötilaero. Pinnan ja väliaineen lämmönsiirtokertoimet ovat vapaassa ja pakotetussa konvektiossa riippuvaisia ilmavirtauksen luonteesta. Laminaarisessa virtauksessa lämmönsiirtokertoimet ovat pienemmät kuin turbulentsissa virtauksessa. Konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle löytyy kirjallisuudesta kaavoja ja likiarvoja, joita voidaan käyttää simuloitaessa hyväksi. (RIL 1984, s. 44; Vinha 2010, s. 52.)

Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai virtaavan nesteen mukana paine-eron vaikutuksesta. Konvektio jaetaan vapaaseen, pakotettuun ja sekoitettuun konvektioon. Vapaassa konvektiossa lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero saa aikaan liikkeen. Yleensä tiheys pienenee lämpötila noustessa, joten lämmin ilma nousee ylöspäin. Vapaa konvektio otetaan huomioon seinien tiiveyttä sekä kosteus- ja lämpöteknistä toimintaa tarkasteltaessa (Siikanen 2012, s. 2). Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu ulkoisen voiman vaikutuksesta. Ulkoisia voimia aiheuttavia ilmiöitä ovat muun muassa paine-erojen aiheuttama virtaus, koneellinen ilmanvaihto sekä kappaleiden liikkeen aiheuttama virtaus. Pakotettu konvektio edellyttää paine-erojen lisäksi rakenteiden tiiveydessä puutteita, mikä mahdollistaa ilmavirtaukset rakenteiden läpi (Siikanen 2012, s. 6). Kuvassa 7 on esitetty virtaavan ilman aiheuttama pakotettu konvektio ja lämpötilaerojen aiheuttama vapaa konvektio.



Kuva 7. Lämmön siirtyminen vapaalla ja pakotetulla konvektiolla väliaineessa (mukaillen Vinha 2010, s. 1).

Virtaavan väliaineen mukana siirtyvä lämpöenergia lasketaan kaavalla (COMSOL 2018)

$$q_{flow} = \rho C_p v * \nabla T, \quad (24)$$

missä

q_{flow} on virtaavan väliaineen siirtämä lämpömäärä [W/m^3],

ρ on väliaineen tiheys [kg/m^3],

C_p on väliaineen ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$],

v on väliaineen virtausnopeus [m/s] ja

∇T on lämpötilagradientti [K/m].

Rakenteiden reunoilla lämmönsiirtyminen konvektiolla otetaan huomioon konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen ja ympäristön lämpötilan ja pinnan lämpötilan avulla seuraavasti reunaehdolla

$$q_0 = h(T_{ext} - T), \quad (25)$$

missä

q_0 on konvektiivinen lämpövirran tiheys [W/m^2],

h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],

T_{ext} on ympäröivän aineen lämpötila [K] ja

T on kiinteän pinnan lämpötila [K].

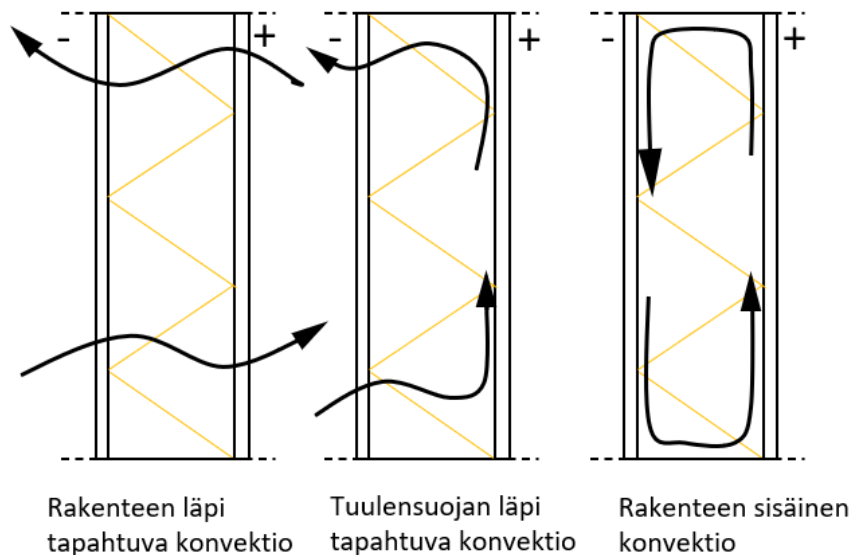
Yhtälö tunnetaan Newtonin jäähtymislakina. Lämmönsiirtymistä konvektiolla tapahtuu suurimmaksi osin ilman ja rakenteen rajapinnoilla, kun rakenteet oletetaan niin tiiviiksi, että niiden läpi ei tapahdu ilmavirtauksia. (Savolainen 2018, s. 26.)

Pakotetussa konvektiossa rakenteiden pinnoilla ulkoinen voima pakottaa ilman liikkumaan. Ilma pystyy varastoimaan itseensä lämpöä ominaislämpökapasiteettinsa verran. Ilmavirtaus varastoi itseensä lämpöä lämpimämmiltä alueilta ja vapauttaa sitä kylmemmille alueille. Tällöin ilmavirtaus siirtää lämpöä lämpimämmästä kylmempään. Pakotetussa konvektiossa lämpövirtaan vaikuttavat ilman nopeus ja lämpötilaero.

Vapaata konvektiota tapahtuu julkisivurakenteiden pinnoilla, kun ulkoilma on viileämpää kuin ulkoseinärakenteen ulkopinta. Seinän lähellä oleva ilmakerros lämpenee, kun seinästä siirtyy lämpöä ilmakerrokseen samalla laajentaen sitä. Ilmakerroksen laajentuessa sen tiheys pienenee, jolloin ilma alkaa virtaamaan seinänsuuntaisesti

ylöspäin. Ilman ominaislämpökapasiteetti mahdollistaa lämmön siirtymisen virtaavan ilman mukana. Lämmönsiirtymisen voimakkuus vapaan konvektion vaikutuksesta riippuu seinän geometriasta ja lämpötilaerosta pinnan ja ilmakerroksen välillä. Lämpövirtaus kasvaa lämpötilaeron suurentuessa.

Rakenteiden sisällä konvektiota voi tapahtua eri tavoin. Kuvassa 8 on esitetty konvektiovirtauksien eri tyyppejä rakenteessa. Rakenteen sisäinen konvektio aiheutuu pintojen välisestä lämpötilaerosta, missä ilma lämpenee lämpimämmän pinnan lähellä ja samalla ilman tiheys pienenee ja ilma nousee ylöspäin. Viileämmän pinnan lähellä taas ilman lämpötila laskee ja sen tiheys kasvaa ja se vajoaa alaspäin. Rakenteen sisäistä konvektiota voi esimerkiksi tapahtua paksun huokoisen eristekerroksen sisällä. Rakenteen läpi tapahtuu konvektiota, kun sisä- ja ulkoilman välillä on paine-ero sekä rakenteen sisäpinnassa sijaitseva ilmasulku ei ole ilmatiivis. Tuulensuojan läpi tapahtuu konvektiota, kun tuulensuoja ei ole ilmatiivis johtuen virheellisestä materiaalivalinnasta, saumojen tiiviyydestä tai asennuksesta. Sisäpinnan toimiva ilmasulku estää konvektion rakenteen läpi. (Vinha 2010, s. 51.)



Kuva 8. Konvektiovirtaukset rakenteissa (mukaillen Vinha 2010, s. 51).

Ilmasulun funktiona on estää rakenteen läpi tapahtuvat haitalliset ilmavirtaukset. Ilmasulkuna toimivan ainekerroksen ilmanläpäisevyys on riittävän pieni. Ilmasulku yleensä asemoidaan rakenteen lämpimälle puolelle sisäpinnan lähelle. Ilmasulkuna voi

esimerkiksi toimia kalvo tai levy. Ilmansulkuna voi toimia myös rakenteen lämmöneriste tai sandwich-rakenteessa sisempi betonikuori. (RIL 255-1 2014, s. 126.)

Konvektion vaikutus ulkoilmaan avoimessa hyvin tuulettuvassa ilmvälissä on merkittävä, joten ilmvälin ja sen ulkopuolisten rakennekerrosten vaikutus rakenteen lämmöneristykseen voidaan jättää joissakin tarkasteluista huomioimatta. Ilmakerrosta pidetään hyvin tuulettuvana, kun ulkoilmaan rajoittuvien ilmvälien poikkipinta-ala pystyrakenteissa on yli $15 \text{ cm}^2/\text{m}$ ja vaakarakenteissa yli $15 \text{ cm}^2/\text{m}^2$. (Vinha 2010, s. 55.)

Yleisesti käytetty menetelmä kosteusvaurioiden estämisessä tuuletusvälein varustetuissa rakenteissa on järjestää tuuletus ulkoilman avulla. Tuuletuksen järjestäminen tällä tavoin aiheuttaa myös ongelmia. Lämpöhäviöiden määrä kasvaa noin 3 % talvikaudella, kun kylmä ulkoilma virtaa rakenteen tuuletusvälissä alle 0,2 m/s nopeudella. Kesäkaudella lämpöhäviö on suurempaa, koska ilmavirtaus tuuletusvälissä poistaa auringon säteilyllä siirtynyttä lämpöä rakenteesta tehokkaasti, ja näin jäähdyttää sitä merkittävästi. Sisäisen kondensaation riski suurenee, jos viileä ilmavirtaus pystyy laskemaan ilmaraon lämpötilan kastepisteen alapuolelle, jolloin kosteutta alkaa kondensoitumaan kylmille pinnoille. (the Wit 2009, s. 149; Nieminen & Salonvaara 2003, s. 14.)

Rakenteessa olevan reiän läpi konvektiolla siirtyvää lämpövirran tiheyttä ja lämpövirtaa voidaan myös mallintaa. Tällöin tutkitaan vauriotilannetta, jossa energiaa ja massaa siirtyy konvektion mukana reiän läpi. (Vinha 2010, s. 59.)

Kaksilasisten ikkunoiden ilmaraoissa lämpö siirtyy kaikilla kolmella tavalla. Ilmaraossa tapahtuu vapaata konvektiota, jonka voimakkuus riippuu ilmaraon korkeuden ja leveyden suhteesta. Vapaan konvektion vaikutus pienenee, kun ilmaraon korkeuden ja leveyden suhde kasvaa eli kun ilmarako on kapea. Johtumalla siirtyvään lämpömäärään vaikuttavat aineiden lämmönjohtavuus, osien pinta-ala ja lasien välinen etäisyys. Lämmönsiirtymistä johtumalla väliaineessa voidaan pienentää kasvattamalla lasien välistä etäisyyttä. Säteilemällä siirtyvää lämpömäärä voidaan pienentää käyttämällä matala emissiivisiä pinnoitteita. Säteilemällä siirtyvä lämpömäärä ei riipu ilmaraon paksuudesta.

Lämmönjohtumisongelmat voidaan jaotella vakiotila eli steady state heat transfer ja transientteihin eli transient heat transfer lämmönjohtumisongelmiin. Vakiotila lämmönjohtumisessa lämpötila on vain paikan funktio $T=T(x,y,z)$. Tällöin lämpötila on ajan suhteen vakio ja mallintamisessa tarvitaan vain parametriksi lämmönjohtavuus λ . Transienteissa lämmönjohtumisongelmissa lämpötila on paikan ja ajan funktio $T=T(t,x,y,z)$. Tällöin mallintamisessa tarvitaan parametreiksi myös materiaalin tiheys ρ ja ominaislämpökapasiteetti C_p . Mallintamisessa pitää myös mahdollisesti huomioida muuttuvatko tarkasteltavat materiaaliparametrit lämpötilan tai kosteuspitoisuuden funktiona.

COMSOL käyttää lämmönsiirtymisyhtälönä kiinteissä kappaleissa matemaattista mallia, jossa ongelmaan on yhdistetty transientti- ja vakiotila lämmönjohtuminen

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla * \mathbf{q} = Q_t, \quad (26)$$

missä ρ on tiheys [kg/m^3],
 C_p on ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$],
 T on lämpötila [K],
 t on aika [s],
 \mathbf{q} on lämpövirran tiheys [W/m^2] ja
 Q_t on lämmöntuotto [W/m^3].

Jos lämmönjohtavuus λ on vakio, mikä edellyttää sitä, että materiaaliparametrit λ , C_p , ϕ , w ja ρ eivät muutu lämpötilan funktiona. Jos simuloinnissa lämpötilanmuutos on suuri, pitää selvittää muuttuvatko materiaaliparametrit lämpötilanfunktiona. Jos materiaaliparametrit muuttuvat lämpötilan funktiona, ne otetaan simuloinnissa ja mallin luonnissa huomioon. Yhtälö (26) saadaan muotoon

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - L_v \delta_p \nabla (\phi p_{v.sat}) = Q_t, \quad (27)$$

missä ρ on tiheys [kg/m^3],
 C_p on ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$],
 T on lämpötila [T],
 t on aika [s],
 λ on lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$],
 L_v on veden höyrystymislämpö [J/kg],
 δ_p on diffuusiokerroin osapaineen avulla [kg/msPa],
 ϕ on suhteellinen kosteus [-],
 $p_{v.sat}$ on vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa] ja
 Q_t on lämmöntuotto [W/m^3].

Yleensä rakenneteknisissä ongelmissa kosteuden ja lämmön siirtyminen ovat kytkeytyneet, eli useat kosteuden siirtymistä kuvaavat parametrit riippuvat lämpötilasta ja lämmönsiirtymistä kuvaavat parametrit riippuvat materiaalin kosteuspitoisuudesta (WUFI 2009). Heat, Air and Moisture eli HAM-laskentaohjelmissa lämmönsiirron yhtälöissä ei yleensä oteta huomioon säteilyn ja rakenteen sisäisen konvektion vaikutusta, vaan ne huomioidaan materiaalien lämmönjohtavuuksissa ja ilmapäleille määritellyissä lämmönvastuksissa (Vinha 2010, s. 88).

4.4 Kosteuden siirtyminen

Rakennustekniikassa kosteudensiirtymissimuloinneilla pyritään selvittämään mikä on esimerkiksi seinärakenteen kosteusjakauma, kun lämpötilat ja suhteelliset kosteuspitoisuudet rakenteen molemmilla puolilla tunnetaan. Simuloinneissa tutkitaan kuinka sateen aiheuttama kosteus leviää, varastoituu ja poistuu rakenteesta. Samoin selvitetään miten rakennusaikainen kosteus haihtuu rakenteista. Tuloksien avulla pystytään varmistamaan, ettei kastepisteen tai liiallisen kosteuden kerääntymiseen ole edellytyksiä. Jos riskejä ilmenee kyseisille ilmiöille, niin rakennetta pystytään muokkaamaan jo suunnitteluvaiheessa. Huokoisten hygroskooppisten materiaalien kosteuspitoisuuden vaikutus materiaalin eristyskykyyn pitää myös selvittää.

Ulkoseinärakenteiden tehtävä on suojata sisätiloja ulkoilman kosteusrasituksilta (RIL 255-1 2014, s. 39). Lisäksi ulkovaipan tehtävänä on eristää lämpöä ja ääntä sekä myös usein toimia kuormia kantavana rakenteena. Ulkovaipan uloimman rakennekerroksen tehtävänä on suojata kantavia rakenteita liialliselta ilmastolliselta rasitukselta, jotta kantava runko voi toimia suunnitellulla tavalla koko elinkaarensa ajan.

Rakenteilla tulee olla riittävä kuivumiskyky, koska lähes aina jossakin elinkaaren vaiheessa rakenteen sisään pääsee vuotovesiä ulko- tai sisäpuolelta. Yleensä rakenteen kuivumiskyky varmistetaan riittävällä tuuletusvälillä. (RIL 255-1 2014, s. 40.)

Ulkoseinärakenteen, siihen liittyvien rakenteiden sekä liitoksien vesihöyryvastuksien ja ilmatiiviyksien on oltava sellaisia, ettei seinän kosteuspitoisuus sisäilman kosteuden diffuusion tai konvektion vuoksi muodostu rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta haitalliseksi. Höyrysulut, saumat ja läpivientien kohdat täytyy olla tiiviitä. Rakennuksen vaipan, rakennekerrosten ja liitosten on estettävä sadetta, viistosadetta ja tuulenpainetta kuljettavasta vettä haitallisesti rakenteiden sisään. (Outinen 2017, s. 3 & s. 7.)

Kosteudensiirtymissimuloinneilla varmistetaan, ettei rakenteen sisälämpötila laske niin alhaiseksi, että se mahdollistaisi kastepisteen muodostumista rakenteen sisään. Myös haitallinen kosteuden kerääntyminen ja poistuminen rakenteesta varmistetaan. Rakenteen sisälämpötilan lasku voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista rakennekerrosten pinnoille lämpötilan laskiessa kriittiseen lämpötilaan eli kastepisteeseen tai sen alapuolelle. Kastepisteen lämpötilassa ilma on vesihöyryn kyllästämää: kastepisteessä ilman vesihöyry alkaa tiivistymään nesteeksi ilmaa kylmemmille pinnoille eli rakenteeseen. Lämpötilan lasku kastepisteen alapuolelle aiheuttaa vesihöyryn tiivistymistä nesteeksi, koska ilman suhteellinen kosteus ei voi ylittää 100 % arvoa.

Rakenteissa oleva kosteus voi esiintyä vetenä, vesihöyrynä tai rakenteisiin sitoutuneena rakennekosteutena. Kosteus voi siirtyä rakenteisiin joko nesteenä tai höyrynä. Kosteuden siirtyminen rakenteisiin ja rakenteiden sisällä voi tapahtua kolmella eri tavalla: vesihöyryn diffuusiolla, kosteuden konvektiolla ja veden kapillaarisella siirtymisellä. Veden painovoimainen siirtyminen voidaan myös lukea yhdeksi kosteuden siirtymisen muodoista, missä vesi kulkee painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Rakennustekniikassa

veden painovoimaista siirtymistä käytetään hyväksi muun muassa sadevesien kuljettamisessa rakennuksesta pois päin. Ei toivottua painovoimaista veden siirtymistä tapahtuu muun muassa puutteellisesti tiivistetyissä saumoissa, raoissa ja läpivienneissä, joista vesi pääsee haitallisesti rakenteisiin. Kapillaarisissa vettä imevissä materiaaleissa kapillaarivoimat ovat yleensä suurempia kuin painovoima ja täten painovoimaisella veden siirtymisellä ei ole kapillaarisissa vettä imevissä materiaaleissa yleensä suurta merkitystä.

Vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan ilmassa vallitsevia vesihöyrynpitoisuuseroja eli vesihöyryn osapaine-eroja. Vesihöyryn diffuusiosta rakenteen eri puolilla vallitseva ilman vesihöyryn pitoisuusero pyrkii tasoittumaan (Vinha 2009, s. 17). Tällöin vesihöyry liikkuu rakenteen läpi korkeammasta pitoisuudesta alhaisempaan pitoisuuteen eli alhaisempaan vesihöyrynosapaine pitoisuuteen. Vesihöyryn määrä voidaan ilmoittaa vesihöyryn pitoisuuserona tai vesihöyryn osapaine-erona. Suurempi vesihöyrynpitoisuusero aiheuttaa voimakkaamman diffuusiovirtauksen rakenteen läpi (Sisäilmayhdistys ry. 2008). Vesihöyryn diffuusiota voidaan pitää ”tyhmänä” kosteuden siirtymismuotona, koska korkeamman vesihöyrypitoisuuden puolella vesimolekyylit osuvat rakenteen pinta-alan satunnaisesti ja siirtyvät rakenteen läpi. Eli vesihöyryn diffuusiosta vesimolekyylit eivät tunnista rakenteessa olevaa reikää, vaan osuvat satunnaisesti rakenteen ulkopinta-alan, vaikkakin reiän kohdalle osuessaan ne liikkuvat nopeammin rakenteen läpi.

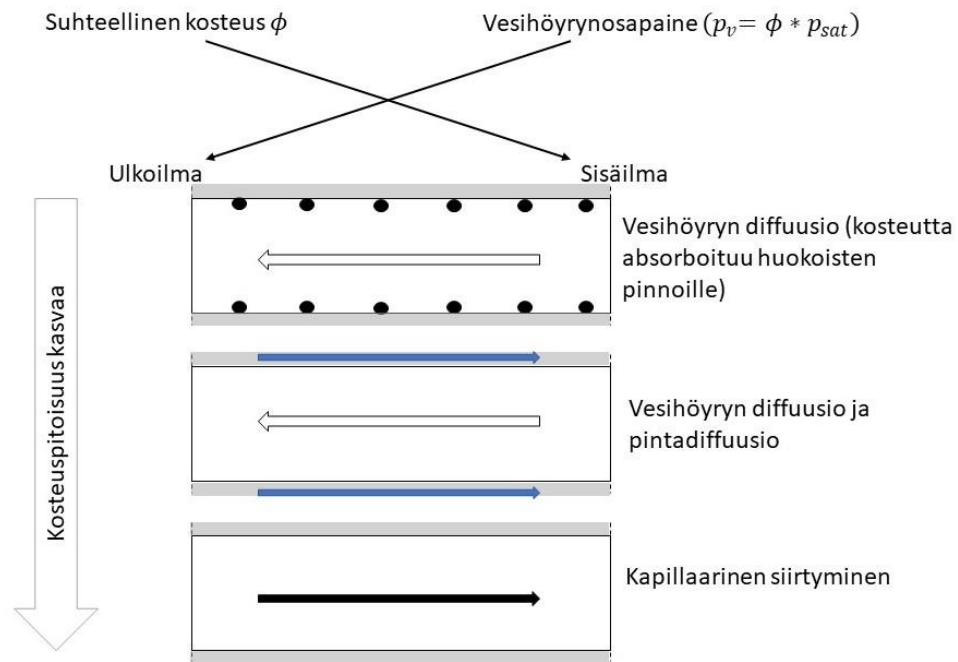
Vesihöyryn diffuusioon rakenteessa vaikuttaa vesihöyrynpitoisuuseron lisäksi materiaalin huokosten koko, vesihöyryn läpäisevyyskyky ja rakennekerrosten järjestys. Vesihöyryn läpäisevyyskyky on materiaaliominaisuus, joka kuvaa materiaalin kykyä päästää vesihöyryä lävitseen. Vesihöyrynläpäisevyys vaihtelee materiaaliakohtaisesti merkittävästi. Diffuusio on voimakkaampaan suuremmissa huokoisissa. Rakenteen rakennekerrosten vesihöyryvastukset vastustavat kyseistä virtausta samalla tavalla kuin lämpövastukset lämmönsiirtymisessä konduktiossa. Rakenteiden rakennekerrosten vesihöyryvastukset pienenevät yleensä ulospäin rakenteessa mentäessä, minkä avulla yritetään estää sisäilman kosteuden kondensoitumista rakenteen sisälle ja samalla parantamaan rakenteen kuivumista. Yleisimmin diffuusion suunta on lämpimästä

kylmempään päin, koska lämpimässä ilmassa on yleensä enemmän kosteutta sitoutuneena kuin kylmässä ilmassa, mutta diffuusion suunta voi joissakin tapauksissa olla päinvastainen. Pohjoismaisissa ilmasto-olosuhteissa vesihöyryn diffuusion suunta on yleensä rakennuksen sisältä ulospäin. Diffuusion suunta voi vaihdella lyhyinä aikoina kesällä sekä rakennusvaiheessa. (Rantala & Leivo 2007, s. 1; Siikanen 2012, s. 12.)

Rakenteiden ulko-osan ja sisäosan vesihöyrynläpäisevyyksien suhde tulisi olla maksimissaan 1:5. Rakenteiden sisäpinnan vesihöyryvastuksen tulisi olla vähintään 15 [$\text{m}^2\text{sPa/kg}$], koska muuten sisäilman sisältä kosteus diffusoituu helposti rakenteen sisään aiheuttaen ongelmia. Tuulensuojan ja rakenteen sisäpinnan vesihöyryvastukset määrittävät diffuusion osalta hyvin pitkälti ulkoseinärakenteen kosteusteknisen toimivuuden. (Sisäilmayhdistys ry. 2008; Vinha ym. 2005, s. 14.)

Kosteuden siirtyminen diffuusiolla voidaan jakaa kolmeen eri diffuusioon. Fickin-, Knudsenin- ja pintadiffuusioon. Fickin diffuusio kuvaa pitoisuuserojen tasoittumista. Fickin diffuusiota tapahtuu huokoisissa materiaaleissa, joissa huokoisten säde on suurempi kuin 1 mikrometri. Knudsenin diffuusiossa vesimolekyylit törmäävät useimmin huokosen seinämiin kuin toisiinsa. Knudsenin diffuusiota tapahtuu alle 5 nanometrin säteen huokoisissa. Materiaalin huokosen säteen ollessa välillä 5 nm - 1 μm diffuusio tyyppi on yhdistelmä Fickin ja Knudsenin diffuusiota. (Künzel 1995, s. 15.)

Diffuusiota voi tapahtua myös pintadiffuusiolla. Pintadiffuusiota tapahtuu huokoisen materiaalin pinnalla, kun materiaalin kosteasta huokosilmasta absorboituu vesimolekyyliä materiaalin pinnalle nestemäisessä muodossa. Muodostuvan kerroksen paksuus materiaalin pinnalle on riippuvainen suhteellisesta kosteudesta. Yleensä nestemäinen vesi liikkuu seinärakenteissa ulkoa sisälle päin ja vesihöyry päinvastaiseen suuntaan. Pintadiffuusiossa kosteus siis siirtyy vastakkaiseen suuntaan kuin Fickin lain mukaisessa diffuusiossa. Kuvassa 9 on esitetty huokoisten hygroskooppisten materiaalien kosteuden siirtomekanismit kosteuspitoisuuden kasvaessa. Pintadiffuusio otetaan huomioon veden kapillaarisen siirtymisen laskennassa kapillaarisen kosteuden johtavuuden D_ϕ määrittelyssä. (Künzel 1995, s. 14 & s. 17.)



Kuva 9. Kosteuden siirtomekanismit huokoisissa hygroskooppisissa rakennusmateriaaleissa (mukaillen Künzelt 1995, s. 14).

Materiaalien vesihöyryvastukset pysyvät samana tai pienenevät suhteellisen kosteuden kasvaessa. Eristeillä yleensä vesihöyryvastukset pienenevät suhteellisen kosteuden kasvaessa. Isolla osalla materiaaleista vesihöyrynvastus pienenee lämpötilan noustessa eli vesihöyrynläpäisevyys kasvaa. (Vinha ym. 2005, s. 96.)

Lämpötilan kasvu lisää materiaalien vesihöyrynläpäisevyyttä. Materiaalin suhteellisen kosteuspitoisuuden kasvu myös lisää joidenkin materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiä. Ei-hygroskooppisilla materiaaleilla suhteellisen kosteuden muutoksella ei ole vaikutusta lämmönjohtavuuden tai vesihöyrynläpäisevyyden arvoihin. (Vinha ym. 2005, s. 3.)

Esimerkiksi 0,2 mm muovikalvon vesihöyrynläpäisevyys on noin kymmenen kertaa pienempi kuin 100 mm paksun betoniseinän sekä tuhat kertaa pienempi kuin 100 mm paksun mineraalivillakerroksen. Tämän takia höyrysulkua käytetään yleisesti rakenteissa estämään vesihöyryn siirtymistä. (Sisäilmayhdistys ry. 2008.)

Vesihöyrynläpäisevyys δ_v [m²/s] vesihöyrypitoisuus eron avulla tai δ_p [kg/msPa] vesihöyrynläpäisevyys osapaine-eron avulla ilmoittaa vesimäärän, joka aikayksikössä läpäisee pinta-alan ja tietyn paksuisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolien välillä vallitsevien olosuhteiden vesihöyrypitoisuuden ero on yksikön suuruinen (Vinha ym. 2005, s. 12). Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys δ_p [kg/msPa] määritetään ilman vesihöyrynläpäisevyyden $\delta_{p,ilma}$ [kg/msPa] ja kyseisen materiaalin diffuusiovastuskertoimen μ avulla

$$\delta_p = \frac{\delta_{p,ilma}}{\mu}, \quad (28)$$

missä δ_p on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys [kg/msPa],
 $\delta_{p,ilma}$ on ilman vesihöyrynläpäisevyys [kg/msPa] ja
 μ on materiaalin diffuusiovastuskertoimen [-].

Vesihöyrynläpäisevyyskerroin W_p [kg/m²sPa] vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmoitettuna on vesihöyryä tarkasteltaessa vastaava materiaaliominaisuus kuin lämmönjohtavuus λ [W/(mK)] lämmönsiirtymisessä. Vesihöyrynläpäisevyyskerroin voidaan myös ilmaista vesihöyrypitoisuuseron avulla W_v [m/s]. Vesihöyrynläpäisevyys muuttuu materiaalin kosteuden muuttuessa. Diffuusiolaskelmat perustuvat vesihöyryn osapaine-eroihin tai materiaalien sisältämiin vesihöyryn pitoisuuseroihin. Laskelmissa pitää käyttää siirtävää voimaa vastaavaa vesihöyryn läpäisevyyttä.

Diffuusionopeus riippuu rakenteen materiaalikerrosten vesihöyryvastuksista Z_v [s/m]. Vesihöyryvastus Z_v [s/m] kuvaa materiaalin vesihöyryn virtausta vastustavaa ominaisuutta. Vesihöyryvastus lasketaan rakennekerroksen paksuuden ja kerroksen vesihöyrynläpäisevyyden avulla

$$Z_i = \frac{d_i}{\delta_i}, \quad (29)$$

missä Z_i on vesihöyryvastus [s/m],
 d_i on rakennekerroksen paksuus [m] ja
 δ_i on kerroksen vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s].

Kaasun tai materiaalin suhteellinen kosteus voi vaikuttaa materiaalin vesihöyryvastukseen. Rakennuslevyjen vesihöyryvastukset riippuvat erittäin paljon ympäristön suhteellisesta kosteudesta. Kerroksellisen rakenteen kokonaishöyryvastus $\sum Z_v$ lasketaan rakenteen kerroksien vesihöyryvastuksen summana. Vesihöyryvastus voidaan ilmaista vesihöyryn pitoisuuden tai osapaineen avulla. Alaindeksi v viittaa vesihöyryn pitoisuuserosta ja alaindeksi p vesihöyryn osapaine-erosta määritettyyn arvoon. Vesihöyryvastus vesihöyryn osapaine-eron avulla määritellään Z_p [$\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$]. Vesihöyryvastuksien arvoja on taulukoitu muun muassa RIL 107-2000:ssa ja RIL 255-1-2014:ssa.

Betonisandwich-elementeissä eristeen vesihöyryvastus vaikuttaa merkittävästi sisäpuoleisen betonikerroksen kosteuspitoisuuteen ja kosteuden siirtymiseen sisemmästä betonikerroksesta eristeen läpi ulkopuoliseen betonikerrokseen. Eristeen pienempi vesihöyryvastus mahdollistaa sisemmän betonikerroksen nopeamman kuivumisen ulospäin.

Materiaalin vesihöyryn diffuusiokestävyys ilmoitetaan yleisesti μ -arvolla. Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ lasketaan ilman vesihöyrynläpäisevyyden ja tutkittavan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden suhteena

$$\mu = \frac{\delta_{p,ilma}}{\delta_p}, \quad (30)$$

missä μ on vesihöyryn diffuusiovastuskerroin [-],
 $\delta_{p,ilma}$ on ilman vesihöyrynläpäisevyys [kg/msPa] ja
 δ_p on materiaalinvesihöyrynläpäisevyys [kg/msPa].

Materiaalin diffuusiovastuskerroin kuvaa vesihöyryn liikettä vastustavaa kyseisen materiaalin ominaisuutta. Oikeastaan diffuusiovastuskerroin μ kuvaa kuinka monen kertainen ilmakerroksen diffuusiovastus on saman paksuisen materiaalikerroksen diffuusiovastuskertoimeen verrattuna. Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin on lämpötilasta sekä suhteellisesta kosteudesta riippuvainen ominaisuus. Simuloinneissa diffuusiovastuskerroin oletetaan yleensä vakioksi. (Künzel 1995, s. 15.)

Ilman vesihöyryläpäisevyys $\delta_{p,ilma}$ riippuu ilman vallitsevasta lämpötilasta ja paineesta. Ilman vesihöyryläpäisevyys halutussa lämpötilassa ja kyseisessä paineessa voidaan laskea Künzelin (Künzel 1995, s. 15) mukaan kaavalla

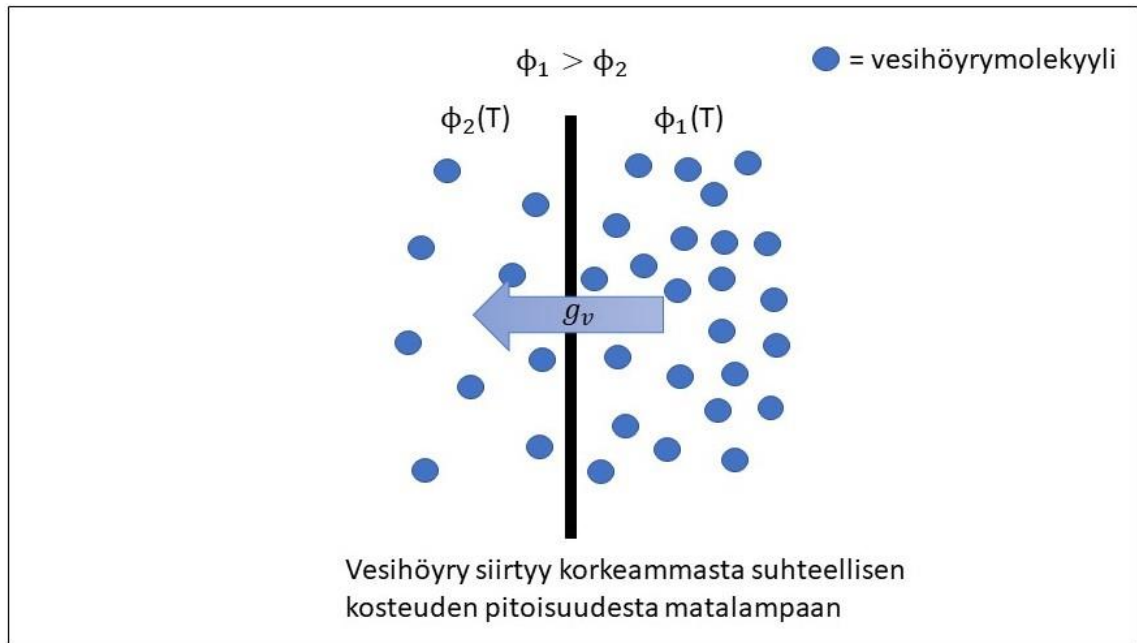
$$\delta_{p,ilma} = \frac{2,0 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0,81}}{p_{ilma}}, \quad (31)$$

missä $\delta_{p,ilma}$ on ilman vesihöyrynläpäisevyys [kg/msPa],
 T on lämpötila [K] ja
 p_{ilma} on ilmapaine [Pa].

Ongelmallinen tilanne syntyy, jos rakenteen sisäpuolelta diffusoituu vesihöyryä enemmän rakenteen sisään kuin sitä pääsee sieltä poistumaan. Tällöin kylmänä vuodenaikana rakenteeseen voi tiivistyä merkittävä määrä kosteutta, joka voi johtaa kosteusvaurion syntymiseen. (Sisäilmayhdistys ry. 2008.)

Yleensä vesihöyryn diffuusio ja veden kapillaarinen siirtyminen tapahtuvat rakenteessa vastakkaisiin suuntiin (WUFI 2009). Vesihöyry siirtyy diffuusiolla korkeammasta suhteellisesta kosteuspitoisuudesta matalampaan suhteelliseen kosteudenpitoisuuteen eli yleensä sisältä ulos, kun kyseessä on isoterminen prosessi. Suhteellinen kosteus on lämpötilariippuvainen suure, joten vesihöyryn diffuusio riippuu näin myös absoluuttisen kosteuden määrästä ilmassa rakenteen eri puolilla. Tämän takia monesti vesihöyryn diffuusio tapahtuu lämpimästä kylmempään eli sisältä ulos (WUFI 2009). Kuvassa 10 on havainnollistettu vesihöyryn siirtymistä diffuusiolla. Pitoisuusero rakenteessa tasoittuu rakenteen eri kerrosten vesihöyryvastusten suhteissa (Lindberg 2015, s. 5). Vesi taas yleensä siirtyy kapillaarisesti kosteasta kuivaan eli ulkoa sisälle. Toisin sanoen

suhteellista kosteutta voidaan pitää ajavana voimana veden kapillaarisessa siirtymisessä (WUFI 2009). Tämän takia vesihöyryn diffuusiolle ja nestemäisen veden siirtymiselle kapillaarisesti on oltava omat ajavat voimat.



Kuva 10. Kosteuden siirtyminen diffuusiolla.

Fickin ensimmäisen lain perusteella kosteuden yksidimensioinen siirtyminen materiaalikerroksen läpi jatkuvuustilassa voidaan lausua vesihöyryläpäisevyyden ja ilman vesihöyrypitoisuuden avulla materiaalin paksuuden yli. Diffuusiokosteusvuo g_v saadaan Fickin laista

$$g_v = -\delta_v \nabla v = -\delta_v \frac{dv}{dx}, \quad (32)$$

missä g_v on kosteusvirran tiheys materiaalin läpi [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],
 δ_v on diffuusiokerroin vesihöyrypitoisuuserolla [m^2/s],
 dv on vesihöyryn pitoisuus [kg/m^3] ja
 dx on tarkasteltava matka [m].

Diffuusiokosteusvuo yleensä lasketaan osapaineen tai suhteellisen kosteuden avulla

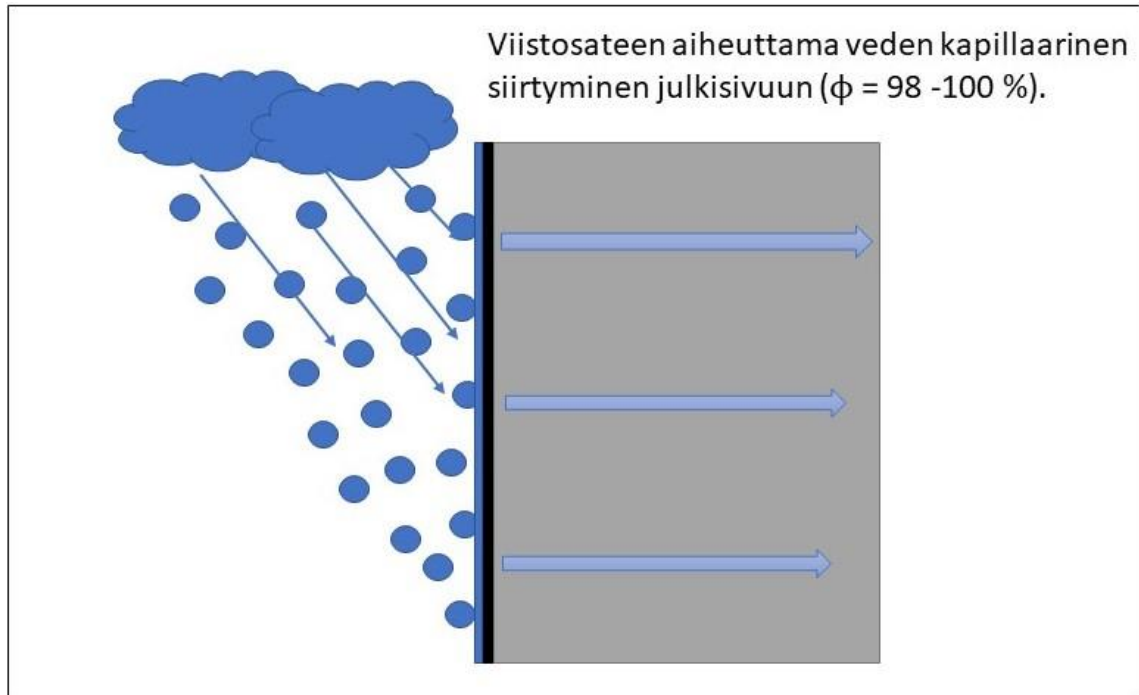
$$g_v = -\delta_p \nabla p_v = -\delta_p \nabla (\phi p_{v.sat}), \quad (33)$$

missä g_v on kosteusvirran tiheys materiaalin läpi [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],
 δ_p on diffuusiokerroin osapaineen kautta ilmaistuna [kg/msPa],
 ϕ on suhteellinen kosteus [-] ja
 $p_{v.sat}$ on vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa].

Kylminä vuodenaikoina kosteus voi kondensoitua betonisandwich-elementin ulkokuoren sisäpinnan ja eristeen väliin muodostaen siihen kuura- tai jääkerroksen. Kondensoituva kosteuden määrä riippuu eristeen, sisäpuoleisen betonikerroksen ja sisäpinnan maalikerroksen vesihöyryvastuksesta ja paksuudesta. Lisäksi kondensoituvaa kosteuden määrään vaikuttavat rakenteen tiiviys, sisä- ja ulkolämpötilat sekä suhteellinen kosteuspitoisuus. Kondensoitunut kosteus imeytyy sulettuaan kapillaarisesti ja diffuusion avulla ulkokuoreen ja sen läpi. (Lehtoviita ym. 2004, s. 33-34.)

Kapillaari-ilmiön aiheuttama nestemäisen veden siirtyminen seinärakenteen ulkopuolelta sisäpuolelle aiheutuu suurimmaksi osin viistosateesta. Viistosateen esiintyminen on todennäköisempää korkeammissa kuin matalimmissa rakennuksissa. Tämä johtuu siitä, että tuulen nopeudet kasvavat korkeammalle mentäessä. Lisäksi ympäröivät rakennukset eivät toimi sateen suojina. (Ilmatieteen laitos 2020.)

Kuvassa 11 on esitetty viistosateen imeytyminen kapillaarisesti huokoiseen julkisivuun. Kapillaarinen veden siirtyminen julkisivuun riippuu julkisivun materiaalista ja pinnoitteesta.



Kuva 11. Veden kapillaarista siirtymistä voi tapahtua viistosateelle alttiissa rakenteessa.

Kapillaarinen veden kulkeutuminen aiheutuu veden pintajännitysvoimien aiheuttamasta huokosalipaineesta. Kapillaarisesti siirtyvän veden määrän määrää materiaalin huokosrakenne. Huokosalipaine vaikuttaa materiaalissa kaikkiin suuntiin, joten vesi voi siirtyä materiaalissa kapillaarisesti joka suuntaan (Pitkäranta 2016, s. 111). Huokosten koko ja huokosverkoston yhtenäisyys määrittävät kapillaarisesti siirtyvän kosteuden määrän. Nestemäisen veden siirtyminen kapillaarisella imulla on tehokkainta materiaalin mikrohuokoisissa (Künzel 1995, s. 14). Kapillaarista veden kulkeutumista voidaan mallintaa vesihöyryn diffuusiolle analogisella mallilla suhteellisen kosteuden avulla lausuttuna

$$g_l = -D_w \nabla w = -D_\phi \nabla \phi, \quad (34)$$

missä g_l on veden kapillaarivuo [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],
 D_w on kapillaarikerroin [m^2/s],
 ∇w on vesipitoisuusgradientti [g/m^2],
 D_ϕ on kapillaarinen kosteuden johtavuus [kg/ms] ja
 $\nabla \phi$ on suhteellisen kosteuden gradientti [$1/\text{m}$].

Kapillaarikertoimille D_w on olemassa kaksi eri arvoa: Imukapillaarikerroin D_{ws} , joka kuvaa veden kapillaarista johtumista, kun materiaalin pinta on kastunut ja materiaali imee sisäänsä kosteutta pinnasta. Imukapillaarikerroin on kosteudesta riippuva. Kapillaarikerroin D_{ww} , joka kuvaa veden kapillaarista johtumista, kun pintaa kosteuttava ilmiö esimerkiksi sade loppuu ja materiaalin sisällä oleva neste alkaa jakautumaan uudelleen. Kapillaarikertoimet ovat voimakkaasti riippuvaisia materiaalin kosteudesta w . Kapillaarikertoimet D_ϕ ja D_w sisältävät pintadiffuusion vaikutuksen (Künzel 1995, s. 17). Kapillaarikertoimille löytyy kirjallisuudesta approksimaatioita. (Künzel 1995, s. 24-25.)

Jos hygroskooppisten ja kapillaarisesti aktiivisten materiaalien käyttäytyminen halutaan lisätä simulaatioon, niin materiaalien kosteuskapasiteettifunktiot ja kapillaarikertoimet D_w [m^2/s] on syytä tuntea. Näiden tietojen hankkiminen on kallista ja työlästä. Materiaaliparametrejä tämän takia voidaan approksimoida jo tunnetusta datasta hygroskooppisille ja kapillaarisesti aktiivisille materiaaleille materiaalivalmistajien parametrikirjastoista. (WUFI 2009.)

Kapillaarijohtuminen voidaan esittää myös kapillaaripaineen p_c avulla. Kapillaarijohtumisen aiheuttaa kapillaari-imu, jonka suuruutta kuvaa kapillaaripaine p_c . Veden kapillaarivuo g_l voidaan esittää

$$g_l = K_v \nabla p_c, \quad (35)$$

missä g_l on veden kapillaarivuo [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],
 K_v on materiaalin vedenläpäisevyys [s] ja
 ∇p_c on painegradientti [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^2$].

Nestemäinen vesi liikkuu huokoisissa materiaaleissa painovoiman sekä kapillaarisen imuvoiman aiheuttamana. Kapillaarinen kosteus on materiaalin huokosalipaineen vaikutuksesta imeytynyttä vettä materiaalin ollessa kontaktissa veteen tai toiseen kapillaarisella kosteusalueella olevaan materiaaliin. Kapillaarinen kosteustasapaino saavutetaan, kun huokosalipaine ja maan vetovoima ovat yhtä suuret eli on saavutettu tasapainotila voimien välillä. Kosteustasapaino voi myös muodostua seinärakenteeseen,

jossa ilmaan haihtuva kosteus vaikuttaa kosteuden nousukorkeuteen seinässä. Kyseessä on transientti tasapainotilanne rakenteeseen kapillaarisesti siirtyvän ja siitä haihtumalla poistuvan kosteuden välillä. Kapillaarinen kosteuden imeytyminen ja liikkuminen riippuvat materiaalin huokosjakaumasta. Pienihuokoisempi materiaali pystyy imemään kosteutta kapillaarisesti enemmän kuin suurihuokoisempi materiaali. Materiaali käyttäytyy kapillaarisesti, kun sen huokosilman suhteellinen kosteus on välillä 98-100 %. Tällöin materiaali voi imeä itseensä vettä ja täyttää huokossysteemin, jos se on kosketuksissa vapaan veden kanssa. Rakenteisiin kosketuksissa olevan ilman kosteudella on myös suuri merkitys. Jos ilman suhteellinen kosteus on lähellä 100 %, niin ilma ei voi vastaanottaa haihtuvaa kosteutta rakenteesta vaan kapillaarinen veden siirtyminen rakenteessa jatkuu. (Sisäilmayhdistys ry. 2020; Kunzel 1995, s. 17-18.)

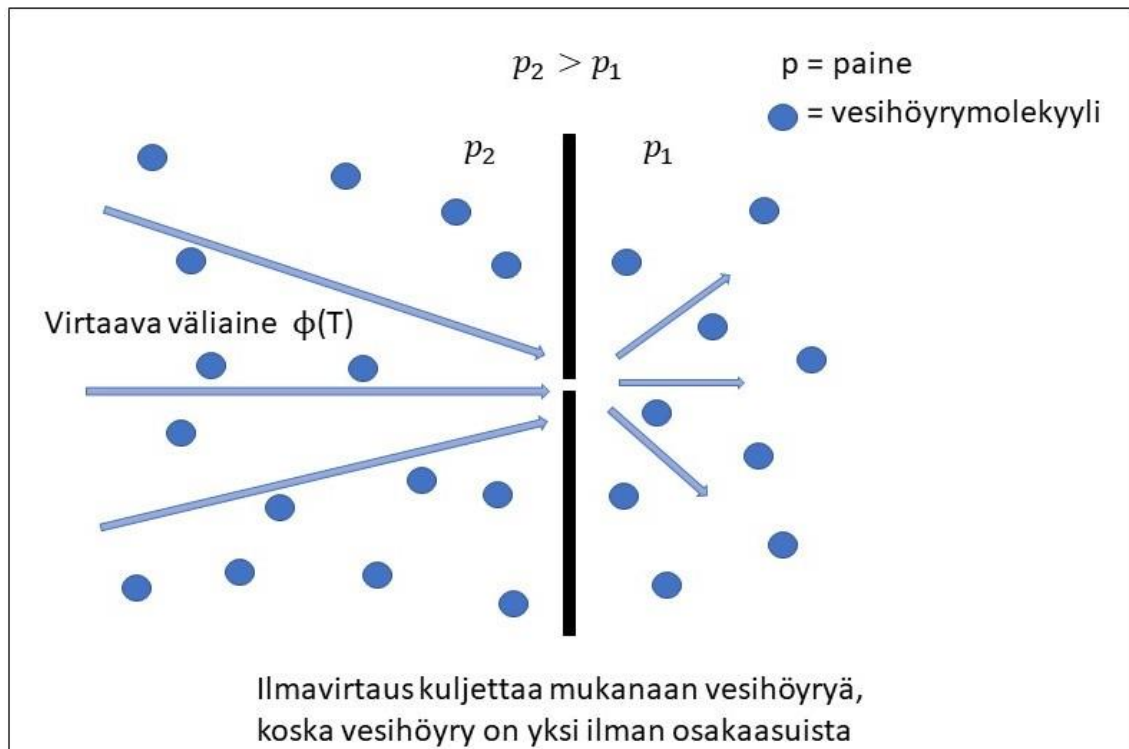
Monet rakennusmateriaalit ovat huokoisia ja ne siten sitoivat vettä kapillaari-ilmion avulla. Kahden huokoisen materiaalin kontaktissa vesi siirtyy suurempi huokoisesta materiaalista pienempi huokoiseen materiaaliin kapillaari-imun avulla. Tämä johtuu siitä, että kapillaari-imu on voimakkaampaa pienissä huokoisissa. Esimerkiksi puun ja betonin ollessa kontaktissa keskenään, puu imee kapillaari-imun avulla vettä betonista, koska puulla on pienempi huokoskoko. Huokoisten materiaalien suhteellisen kosteuden ollessa yli 90 %, kapillaari-imulla on suuri vaikutus materiaalien kosteustekniseen käyttäytymiseen. (the Wit 2009, s. 84-85.)

Märässä materiaalissa esimerkiksi betonissa, jonka kosteuspitoisuus on kriittisen kosteuspitoisuuden yläpuolella, kosteuspitoisuus on kapillaarisella alueella. Kriittinen kosteuspitoisuus on esitetty Kuvassa 3 sivulla 53. Materiaali alkaa kuivumaan siten, että vesi poistuu ensiksi kapillaarisesti materiaalista nopeudella, jonka materiaalin pinta ehtii haihduttamaan ympäristöön. Ympäristön olosuhteet vaikuttavat merkittävästi materiaalin pinnan haihtumisnopeuteen. Materiaalin pinnan kosteuspitoisuuden laskettua alle kriittisen kosteuspitoisuuden kapillaarinen siirtyminen loppuu, jonka jälkeen kuivumisnopeus hidastuu merkittävästi, koska materiaalin ainoa kuivumistapa on diffuusio. Materiaalin kuivumisaikaan vaikuttaa merkittävästi kosteuden poistumismatka. Esimerkiksi materiaalin paksuutta kasvattamalla kaksinkertaiseksi, kuivumisaika nelinkertaistuu. Kuivumisen tapahtuessa kahteen suuntaan kuivumisaika laskee neljännesosaan. (Lehtoviita ym. 2004, s. 41-42.)

Materiaalin korkea umpisolurakenteen osuus tarkoittaa sitä, että materiaali on melkein kokonaan ei-huokoinen ja kosteuden siirtyminen tapahtuu diffuusion avulla, koska materiaalissa on vain vähän kapillaarihuokoisten muodostamia verkostoja. Tällöin kapillaarinen kosteuden siirtyminen on estetty.

Vesihöyry siirtyy konvektiossa ilmavirtauksen mukana, koska vesihöyry on yksi ilman osakaasuista. Konvektiossa ilmavirtaus pääsee rakenteen sisään liitoksien ja saumojen rei'istä ja halkeamista sekä huokoisten ja hyvin ilmaa läpäisevien materiaalien läpi. Ilmavirtauksen mukana rakenteen sisälle siirtyy ilman sisältämää kosteutta ja epäpuhtauksia. Konvektio johtuu paine-eroista rakenteen eri puolien välillä. Konvektiossa siirtyvän ilman määrä ja kosteuspitoisuus riippuvat vallitsevasta paine-erosta, raon- tai halkeaman koosta, muodosta sekä paksuudesta. Huonosti tiivistetyt liitokset lisäävät konvektion määrää. (Rantala & Leivo 2007, s. 1.)

Kosteuden konvektiota voidaan pitää ”viisaana” kosteuden siirtymisprosessina verrattuna vesihöyryn diffuusioon, jossa vesimolekyylit osuivat rakenteen ulkopintaa satunnaisesti joka paikassa. Kosteuden konvektiossa esimerkiksi paine-ero toimii ajavana voimana. Tällöin jos rakenteessa on reikä, niin paine-ero pyrkii tasoittumaan eri puolien välillä, ja kosteuden konvektio tapahtuu reiän läpi ilmavirtaukseen sitoutuneena Kuvan 12 mukaisesti.



Kuva 12. Kosteuden siirtyminen konvektiolla rakenteessa olevan reiän läpi.

Yhdistetyissä lämpö- ja kosteussimuloinneissa rakenteet oletetaan niin ilmatiiviiksi, että ilmavirtauksia rakenteiden läpi ei oteta huomioon (Künzel 1995, s. 30). Kosteuden siirtyminen rakenteiden ja ympäristön välillä voidaan kuvata reunaehdon avulla. Kosteusvirrantiheys on analyyttinen lämpövirrantiheyden kanssa. COMSOLissa kosteusvirran tiheys rakenteiden pinnoilla voidaan määrittää pitoisuus- tai paine-eron avulla. Kosteus siirtyy rakenteiden pinnoilla ainoastaan konvektion välityksellä. Künzelin mukaan (Künzel 1995, s. 30) paine-eron avulla ilmaistaan

$$g_0 = \beta_p(p_{v.ext} - p_v), \quad (36)$$

missä

g_0 on kosteuden massavirran tiheys [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],

β_p on kosteudensiirtymiskerroin [$\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$],

$p_{v.ext}$ on ympäröivän vesihöyryn osapaine [Pa] ja

p_v on vesihöyryn osapaine materiaalin pinnalla [Pa].

Kosteudensiirtymiskertoimet määritetään sisä- ja ulkopinnoille sekä mahdollisille ilmaraoille. Kosteudensiirtymiskerroin on diffuusiokerroin, joka kuvastaa materiaalin pinnan kosteusvirran läpäisykykyä (Savolainen 2018, s. 36). Kosteudensiirtymiskerroin β_p voidaan johtaa konvektiivisesta lämmönsiirtokertoimesta analogisesti Künzelin mukaan (Künzel 1995, s. 31) seuraavasti

$$\beta_p = 7 * 10^{-9} * h, \quad (37)$$

missä β_p on kosteudensiirtymiskerroin [$\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$] ja
 h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

Ulko- ja sisäpinnoille on molemmille omat konvektiiviset kosteudensiirtokertoimet. Konvektiiviset lämmön ja kosteuden siirtymiskertoimet voidaan olettaa vakioksi, koska rakenteen pinnalla olevan ilmakerroksen lämpövastus on huomattavasti pienempi kuin rakennekerrosten muodostama lämpövastus, ja näin konvektiivisten siirtymiskertoimien vähäinen muuttuminen ei johda virheellisiin tuloksiin. Täten ulko- ja sisäpuolisille konvektiivisille lämpö- ja kosteudensiirtymiskertoimille voidaan käyttää vakioarvoja. Taulukossa 3 on esitetty ulko- ja sisäpuoliset konvektiiviset kosteudensiirtokerroimet, joita voidaan käyttää simulointimallia rakentaessa. Kosteuden siirtymiskertoimessa otetaan huomioon vain konvektion vaikutus toisin kuin lämmönsiirtymiskertoimessa otetaan huomioon konvektion, että säteilyn vaikutus. (WUFI 2009.)

Taulukko 3. Konvektiiviset kosteudensiirtymiskertoimet rakenteen sisä- ja ulkopinnalle (WUFI 2009).

| Rakenteen pinta | Konvektiivinen kosteudensiirtymiskerroin β_p [$\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$] |
|-----------------|---|
| Ulkopinta | $75 * 10^{-9}$ |
| Sisäpinta | $25 * 10^{-9}$ |

Ilma voi virrata rakennuksen vaipan sisään ja läpi. Lämmön ja kosteuden siirtyminen virtaavan ilman mukana on yleensä määräävämpi tekijä kuin lämmön siirtyminen säteilemällä ja konduktiolla sekä kosteuden siirtyminen diffuusiolla. Ilman virtaus rakennuksen vaipan läpi voi vaikuttaa huoneen ilmanvaihtoon merkittävästi. Ilman virtaus voi tarkoituksellisesti poistaa kosteutta ilmaraoista tai lasien väleistä tai tarkoituksettomasti tunkeutua liitoksiin ja halkeamiin. (the Wit 2009, s. 127.)

Kaasujen osapainelain mukaisesti kaikki ilman sisältämät kaasut käyttäytyvät erikseen. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi huoneen ilman hiilidioksidipitoisuus pyrkii myös tasoittumaan eli virtaus suuntautuu korkeammasta pitoisuudesta matalampaan pitoisuuteen. Samoin käyttäytyvät muutkin ilmassa olevat kaasut. Tämän vuoksi ilmassa olevat kaasut eivät välttämättä virtaa samaan suuntaan rakennuksen vaipan yli, jos mahdollista. (Siikanen 2012, s. 12.)

Kosteuskonvektion aiheuttama kosteusvaurioriski on aiheellista huomioida kylminä vuodenaikoina, kun kosteaa ilmaa siirtyy paine-erojen aikaansaamana rakenteisiin vuotokohdista, ja ilman sisältämä kosteus alkaa kondensoitumaan rakenteisiin lämpötilan laskiessa. Yleensä rakennuksen painesuhteet ovat siten, että rakennuksen yläosa on ylipaineellinen, joten ongelmat kohdistuvat yläpohjarakenteisiin ja niihin liittyviin rakenteisiin sekä niiden liitosalueille. (Sisäilmayhdistys ry. 2008.)

Konvektio rakenteessa voi olla hallittua tai hallitsematonta. Hallittua konvektiota tapahtuu muun muassa seinärakenteiden tuuletusraoissa, joissa paine-eron aikaansaama ilmavirtaus kuljettaa kosteutta ja epäpuhtauksia rakenteen sisältä pois pienentäen rakenteen turmeltumisen riskiä. Hallitsematonta konvektiota ilmenee ilmavuodoissa, jossa rakenteen rei'istä ja railoista ilmavirtaus pääsee tapahtumaan. Kosteuskonvektiolla ilman virtausreittejä pitkin siirtyy yleensä enemmän kosteutta rakenteisiin, kuin diffuusiolla tai ilman virtauksella materiaalien läpi (Sisäilmayhdistys ry. 2008). Rakenteen reiän läpi kulkevan ilmanmäärän avulla voidaan laskea konvektion kosteusvirta, jos ilman absoluuttinen kosteus tiedetään

$$g_k = \varphi \dot{Q}, \quad (38)$$

missä g_k on konvektion kosteusvirta [kg/s],
 φ on ilman absoluuttinen kosteus [g/m³] ja
 \dot{Q} on reiän läpi kulkevan ilmamäärän tilavuusvirta [m³/s].

Jos rakenteen eri puolilla ilman absoluuttinen kosteus eli vesihöyrypitoisuus vaihtelee, niin konvektion kosteusvirta saadaan

$$g_k = (\varphi_i - \varphi_e)\dot{Q}, \quad (39)$$

missä g_k on konvektion kosteusvirta [kg/s],
 φ_i on sisäilman absoluuttinen kosteus [g/m³],
 φ_e on ulkoilman absoluuttinen kosteus [g/m³] ja
 \dot{Q} on reiän läpi kulkevan ilmamäärän tilavuusvirta [m³/s].

Kaavan (39) käyttö edellyttää, ettei vesihöyryä tiivisty rakenteen sisään. Jos halutaan mallintaa kosteuden siirtymistä ilmavirtauksen mukana konvektiolla, niin COMSOL (COMSOL 2018, s. 234-235) käyttää kosteusvirran laskemisessa vesihöyryn konsentraatiota apuna seuraavasti

$$g_k = v * \nabla(M_v \phi c_{v.sat}), \quad (40)$$

missä g_k on kosteuskonvektiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys [kg/s],
 v on ilman virtausnopeus [m/s],
 M_v on vesihöyryn moolimassa [kg/mol],
 ϕ on virtaavan ilman suhteellinen kosteus [-] ja
 $c_{v.sat}$ on vesihöyryn kyllästyskonsentraatio [mol/m³].

Simuloinneista konvektio jätetään yleensä pois, koska sen mallintaminen on haastavaa ja se edellyttää usein 3D-mallia. Yhdistetyissä lämpö- ja kosteussimuloinneissa rakenteet oletetaan niin ilmatiiviiksi, ettei ilmavuotoja rakenteiden läpi oteta mallinnuksessa huomioon (Künzel 1995, s. 30).

Materiaalin kosteustasapainoa kuvaa differentiaaliyhtälö, jossa vasemmalla puolella on kosteuden varastoitumistermit ja oikealla kosteudensiirtymistermit

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \mathbf{g} = \nabla(D_w \nabla w + \delta_v \nabla v), \quad (41)$$

missä w on kosteuspitoisuus [kg/m^3],
 t on aika [s],
 D_w on kapillaarikerroin [m^2/s],
 δ_v on diffuusiokerroin vesihöyrypitoisuuserolla [m^2/s],
 ∇w on vesipitoisuusgradientti [g/m^2] ja
 ∇v on konsentraatiogradientti [g/m^2].

Kosteusvuon yhteisvaikutus \mathbf{g} koostuu veden kapillaarijohtumisen g_l ja vesihöyryn diffuusion g_v kosteusvoiden superpositiosta. Konvektion kosteusvuota ei ole tässä differentiaaliyhtälössä huomioitu. Suhteellisen kosteuden ollessa kosteuspitoisuuden funktio $w(\phi)$, saadaan kosteuden siirtymisen differentiaaliyhtälö muotoon

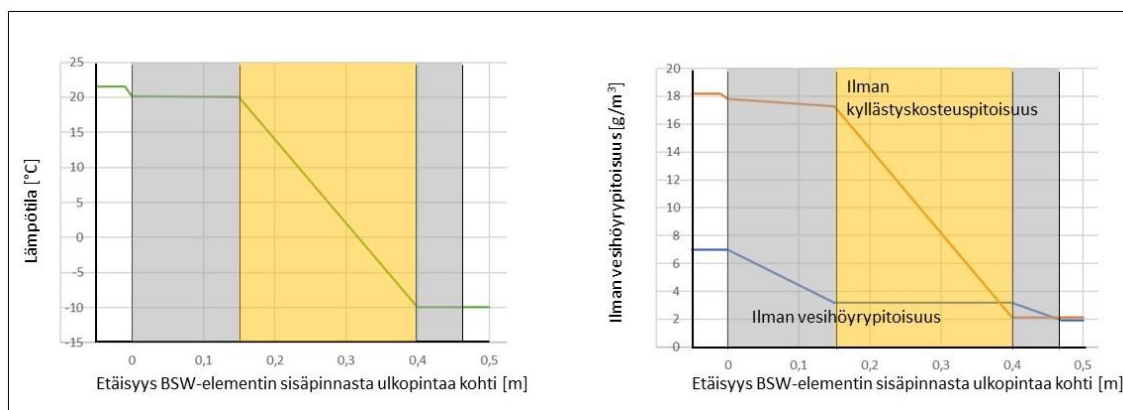
$$\frac{dw}{d\phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla(D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla(\phi p_{v.sat}(T))), \quad (42)$$

missä w on kosteuspitoisuus [kg/m^3],
 ϕ on suhteellinen kosteus [-],
 t on aika [s],
 D_ϕ on vedenjohtumiskerroin [kg/ms],
 T on lämpötila [K],
 δ_p on diffuusiokerroin osapaineen avulla [kg/msPa] ja
 $p_{v.sat}$ on vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa].

Vasemmalla puolella yllä olevassa differentiaaliyhtälössä on kosteudenpitoisuuden suhde suhteelliseen kosteuteen eli kosteuskapasiteetti kuvaamassa kosteuden varastoitumiskykyä. Kapillaarinen kosteuden siirtyminen ja diffuusio on esitetty COMSOLissa käytettävällä tavalla suhteellisen kosteuden avulla.

Rakenteiden kosteusteknisillä laskentamenetelmillä voidaan arvioida rakenteiden kosteuden vaihteluita ajan funktiona ja kosteuden jakautumista rakenteessa. Menetelmät jaetaan menetelmiin, jotka ottavat huomioon materiaalien kosteuskapasiteetin ja menetelmiin, jotka eivät ota huomioon materiaalien kosteuskapasiteettia.

On olemassa muutamia menetelmiä kastepisteen, kosteuden kondensaation ja haihtumisen faasimuutoksen määrittämiseksi. Yksinkertaisimmin kondenssiriski tarkastetaan stationäärisellä Glaser-menetelmällä. Glaser-menetelmässä kerrosten paksuudet piirretään vesihöyryvastuksiin verrannollisina. Tämän avulla saadaan vesihöyryn osapaineen kuvaajaksi suora, kun oletetaan, että lämmönjohtavuus ei riipu materiaalin kosteuspitoisuudesta. Lämpötilajakauma lasketaan normaaliin tapaan. Lämpötilajakaumaa vastaava kylläisen vesihöyryn osapaineen käyrä kuvaa kondensoitumisen rajaa, jonka ylittyminen johtaa kosteuden kondensoitumiseen. Kuvassa 13 on esitetty Glaser-menetelmällä suoritettua betonisandwich-elementin kosteusteknisen toimivuuden tarkastelua. (RIL 1984, s. 122-123; RIL 255-1 2014, s. 76.)



Kuva 13. Glaser-menetelmällä suoritettu BSW-elementin kosteusteknisen toimivuuden tarkastelu (mukaihen RIL 255-1 2014, s. 76).

Glaser-menetelmää käytetään määrittämään kondensaatiota ajan suhteen vakiotilassa. Laskelma suoritetaan kuukausien keskiarvoilla (ISO 13788). Glaser-menetelmässä lähtöarvoiksi tarvitaan materiaalien osalta lämmönjohtavuudet λ ja vesihöyryvastukset Z_v . Ilmastodatasta tarvitaan kuukausien keskiarvo lämpötilat T ja suhteellisen kosteuden pitoisuudet ϕ , joiden avulla pystytään määrittämään vesihöyryn osapaineet rakenteen eri puolilla. Menetelmän avulla pystytään määrittämään rakenteesta kohta, jossa

vesihöyrynosapaine ylittää vesihöyryn kyllästymispaineen, ja kosteutta alkaa kondensoitumaan kyseiseen kohtaan rakenteen sisään. Lisäksi pystytään määrittämään vesihöyrystä kondensoituneen veden massa aikayksikössä. Rakenneosien rajapintojen yli siirtyvä vesihöyryn virtauksen tiheys voidaan määrittää sisään ja ulospäin. Jos rakenneosan sisäänpäin siirtyvä vesihöyryvirtauksen tiheys on suurempi kuin ulospäin siirtyvä vesihöyryvirtauksen tiheys rakenneosan läpi, niin rakenneosan sisällä kosteuspitoisuus kasvaa.

Menetelmillä voidaan määrittää vesihöyryn kondensoitumista rakenteisiin. Samalla voidaan seurata rakenteen suhteellisen kosteuden arvoja halutuissa kohdissa ja arvioida rakenteen homehtumisriskiä vesihöyryn diffuusiovirtauksen seurauksena. Kondensoituvan ja haihtuvan veden määrä koko vuodella saadaan summaamalla kondensoituvan ja haihtuvan veden määrä kuukausittain yhteen vuoden ajan. Haihtuvan veden määrä huomioidaan negatiivisena.

Rakennusosille asetetaan vaatimuksia estämään liiallista kosteuden kerääntymistä. Nestemäisen veden tunkeutuminen rakenteeseen ulko- ja sisäpuolelta pitää kokonaan estää. Sisäpuoleisen ilman suhteellinen kosteuspitoisuus ei saisi ylittää raja-arvoa 80 % (Vinha 2008, s. 8). Rakennusmateriaalien täytyy olla riittävän kuivia rakentamisen ja asentamisen aikana, sekä kosteuden kerääntyminen diffuusiolla pitää olla määritetyn rajan alapuolella. Huokoisissa materiaaleissa pääasialliset kosteuden siirtymämekanismi ovat vesihöyryn diffuusio, pinnan diffuusio ja veden kapillaarinen johtuminen.

4.5 Yhdistetty lämmön ja kosteuden siirtyminen

Rakenteiden rakennusfysikaalisen käyttäytymisen analysoimiseksi on tärkeää käsitellä yhdistettyä lämmön ja kosteuden siirtymistä. Lämmönjohtumisen yhtälö perustuu energian säilymiseen ja kosteuden siirtymisen yhtälö massan säilymiseen. Energian säilymisessä energiaa ei voi tuhota, vaan se muuttaa muotoaan. Massan säilymislaissa ainetta ei synny eikä häviä, vaan se muuttaa muotoaan. Lämmönjohtumisessa materiaalille ei ole maksimiarvoa. Kosteuden siirtymisessä maksimiarvona toimii kyllästyskosteus eli suhteellisen kosteuden arvo 100 %, jonka ylittyminen johtaa kosteuden tiivistymiseen vetenä viileämmille pinnoille, jos lämpötila laskee kastepisteen alapuolelle. (the Wit 2009, s. 83-84.)

Lämmönvarastoitumista kuvaavat parametrit C_p ja ρ voidaan olettaa muuttumattomiksi laajalla lämpötila-alueella. Materiaalien diffuusiovastuskerroin μ pidetään kosteuden suhteen vakiona. Kosteuspitoisuuden muutos otetaan huomioon kapillaarikertoimen avulla. Kosteuden siirtymistä kuvaava parametri kapillaarikerroin D_w on riippuvainen kosteudesta ja lämpötilasta, ja täten on huomattavasti epälineaarinen. Kosteuden muutoksen vaikutus lämmönjohtumiseen on vähäinen, kun taas lämpötilan muutos vaikuttaa paljon kosteuden siirtymiseen. Tämän takia joudutaan usein tarkastelemaan kytkettyä lämmön ja kosteuden siirtymisongelmaa. Yhdistetyssä lämmön ja kosteuden siirtymisongelmassa lämpötilan muutos aiheuttaa kosteuden siirtymistä ja taas kosteuden muutos lämmönjohtumista. (the Wit 2009, s. 83-84.)

Lämmön ja kosteuden siirtymisprosessit ovat usein vahvasti toisiinsa kytkeytyneet reaalimaailmassa. Kosteuden vaikutus lämmöneristyskykyyn on huomattava, koska monilla materiaaleilla, esimerkiksi betonilla lämmönjohtumiskerroin on riippuvainen materiaalin sen hetkisestä kosteuspitoisuudesta $\lambda(w)$. Materiaalien lämpövastusthan R on materiaalin paksuuden d ja lämmönjohtavuuden λ suhde. (WUFI 2009.)

Vahvasti epälineaariset ominaisuudet yhdistetyssä lämmön ja kosteuspitoisuuden muutoksessa ovat materiaalien mekaaninen venymä ja paisuminen, johtuen lämpölaajenemisesta ja kosteuspitoisuuden muutoksen aiheuttamasta muutoksesta materiaalin tilavuuteen. Venymä ja paisuminen aiheuttavat materiaalin sisäisiä

jännityksiä, jotka voivat ylittää materiaalin vetojännityksen arvon ja täten aiheuttaa materiaalin halkeilua. (WUFI 2009.)

Lämmön ja kosteuspitoisuuden muutokset aiheuttavat lisäksi rakennusmateriaaleihin suola- ja pakkasvaurioita. Suola- ja pakkasvauriot perustuvat veden tilavuuden muuttumiseen lämpötilan funktiona ja suolan suhteellisen kosteuden muuttumiseen, jolloin veden ja suolan tilavuus kasvaa. Tilavuuden kasvu aiheuttaa sisäisiä jännityksiä ja voi näin vaurioittaa rakennetta vetolujuuden ylittyessä. Pakkasrapautumisessa sulamis-jäätymisilmiöllä sekä myös jäätymis-sulamisilmiöllä on suuri merkitys. (WUFI 2009.)

Vaihtelevasta lämpötilasta ja kosteudenmuutoksesta johtuvat venymät testaavat rakennusmateriaalien säilyvyyttä ja soveltuvuutta. Tämän takia on tärkeää suorittaa simulointeja ja tutkia rakenteita sekä materiaaleja mahdollisimman todennukaisissa ilmasto-olosuhteissa, jotta saataisiin mahdollisimman tarkkoja tuloksia vastaamaan reaaliaikailman olosuhteita. Käsien laskentamenetelmillä kuten Glaser-menetelmällä, joka perustuu vesihöyryn diffuusioon materiaalissa ei pystytä saamaan yleensä näin tarkkoja tuloksia. (WUFI 2009.)

Epälineaarisilla ajasta riippuvilla lämpö- ja kosteussimuloinneilla, jotka sisältävät kaikki tarvittavat lämmön ja kosteuden siirtymismekanismat riittävässä ilmastollisessa rasiuksessa saadaan tarkkoja ja onnistuneita tuloksia, joiden avulla rakenteet voidaan suunnitella rakennusfysikaaliselta toiminnaltaan toimivimmiksi. Tämä edellyttää lämmön ja kosteuden siirtymisen yhtälöiden syvällistä tuntemusta. (WUFI 2009.)

Epälineaarisessa ajasta riippuvassa laskennassa lämmönjohtavuuden materiaaliominaisuuksien arvoihin pitää ottaa huomioon piilevän lämpövaikutuksen eli latenttilämmön vaikutus. Piilevät lämpövaikutukset ovat usein lyhytkestoisia ja niitä ei oteta huomioon materiaalien oikeita lämmönjohtavuuden arvoja laskiessa. Piilevät lämpövaikutukset eivät ole materiaalien luonteenomaisia ominaisuuksia vaan riippuvat viereisistä materiaaleista. Siksi epälineaarisessa laskennassa ei voida käyttää rakenteen U-arvoa laskettuna vakio-tilassa. Latenttilämpö sisällytetään lämmönsiirtymisen tasapainoyhtälöön. (WUFI 2009; Savolainen 2018, s. 37.)

Lämmön ja kosteuden siirtymisen kytkeytyminen monimutkaistaa laskentaa, koska materiaalien vallitseva kosteuspitoisuus ja faasimuutoksien latenttilämpö pitää sisällyttää tasapainoyhtälöihin. Lämpötila vaikuttaa suhteellisen kosteuden arvoon, ja täten vaikuttaa kosteudensiirtymisen tasapainoyhtälöön, jolloin lämpötila pitää huomioida tasapainoyhtälössä. Yhdistetystä lämmön ja kosteuden siirtymisen kytkeytymisestä saadaan kahden osittaisdifferentiaaliyhtälön yhtälöpari, jonka ratkaisemiseen käytetään numeerisia menetelmiä. (Künzel 1995, s. 30; Savolainen 2018, s. 37).

COMSOL (COMSOL 2020, s. 5) käyttää yhdistetyssä lämmön ja kosteuden siirtymisessä ”coupled heat and moisture transport in building materials” lämmön siirtymisyhtälöinä huokoisissa materiaaleissa yhtälöitä (7), (13), (26) ja (33), jotka COMSOL yhdistää differentiaaliyhtälö muotoon. COMSOL käyttää lämmön siirtymisyhtälönä kiinteissä kappaleissa matemaattista mallia

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla * \mathbf{q} = Q_t, \quad (43)$$

missä ρ on tiheys [kg/m³],
 C_p on ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)],
 T on lämpötila [K],
 t on aika [s],
 \mathbf{q} on yhdistetty lämpövirran tiheys [W/m²] ja
 Q_t on lämmöntuotto [W/m³].

Differentiaaliyhtälön ensimmäinen termi vasemmalla puolella on lämpöenergian varastoitumiskykyä kuvaava termi. Jälkimmäinen termi yhtälön vasemmalla puolella sisältää lämmönsiirtymisen Fourierin lain mukaisesti sekä faasimuutoksen latenttilämmön. Yhtälön oikealla puolella on systeemiin siirtyvä lämmöntuotto, joka olisi esimerkiksi auringon säteilynä siirtyvä lämpöenergia systeemiin. Yhdistetty lämpövirta \mathbf{q} koostuu lämmönjohtumisen (13) ja faasimuutoksen latenttilämpölähteen entalpian (33) osista seuraavasti

$$\mathbf{q} = - \left(\lambda_{eff} \nabla T + L_v \delta_p \nabla (\phi p_{v.sat}) \right), \quad (44)$$

missä q on yhdistetty lämpövirran tiheys [W/m^2],
 λ on lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$],
 T on lämpötila [K],
 L_v on veden höyrystymislämpö [J/kg],
 δ_p on diffuusiokerroin osapaineen avulla [kg/msPa],
 ϕ on suhteellinen kosteus [-] ja
 $p_{v.sat}$ on vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa].

Ensimmäinen termi yhtälön oikealla puolella edustaa Fourierin lain mukaista lämmönjohtumista. Jälkimmäinen termi yhtälön oikealla puolella edustaa faasimuutoksen latenttilämpölähteitä veden ja vesihöyryn tiivistymisestä tai haihtumisesta faasista toiseen. Yhdistämällä kaavat (43) ja (44) saadaan yhdistetyksi lämmön ja kosteuden siirtymisen lämmön differentiaaliyhtälöksi

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla * - \left(\lambda_{eff} \nabla T + L_v \delta_p \nabla (\phi p_{v.sat}) \right) = Q_t, \quad (45)$$

missä ρ on tiheys [kg/m^3],
 C_p on ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$],
 T on lämpötila [K],
 t on aika [s],
 λ on lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$],
 L_v on veden höyrystymislämpö [J/kg],
 δ_p on diffuusiokerroin osapaineen avulla [kg/msPa],
 ϕ on suhteellinen kosteus [-],
 $p_{v.sat}$ on vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa] ja
 Q_t on lämmöntuotto [W/m^3].

Kosteuden siirtymisyhtälöinä yhdistetyssä lämmön ja kosteuden siirtymisessä COMSOL (COMSOL 2020, s. 5) käyttää kolmea yhtälöä (12), (33) ja (34), joista saadaan differentiaaliyhtälö

$$\xi \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla * \mathbf{g} = G, \quad (46)$$

missä ξ on kosteuskapasiteetti [kg/m^3],
 ϕ on suhteellinen kosteus [-],
 t on aika [s],
 \mathbf{g} on yhdistetty kosteusvirrantiheys [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] ja
 G on kosteudentuotto [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$].

Differentiaaliyhtälön ensimmäinen termi vasemmalla puolella on kosteuden varastoitumiskykyä kuvaava termi. Jälkimmäinen termi yhtälön vasemmalla puolella sisältää kosteuden siirtymisen kapillaarisesti ja diffuusiolla. Differentiaaliyhtälön oikean puolen termi sisältää kosteudentuoton, esimerkiksi viistosateen tuoman kosteuslisän systeemiin. Yhdistetty kosteusvirrantiheys \mathbf{g} koostuu vesihöyryn diffuusion (33) ja kapillaarisen veden siirtymisen (34) osista suhteellisen kosteuden avulla ilmaistuna

$$\mathbf{g} = -(\xi D_w \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{v.sat})), \quad (47)$$

missä \mathbf{g} on yhdistetty kosteusvirrantiheys [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],
 ξ on kosteuskapasiteetti [kg/m^3],
 D_w on kapillaarikerroin [m^2/s],
 ϕ on suhteellinen kosteus [-],
 δ_p on diffuusiokerroin osapaineen avulla [kg/msPa] ja
 $p_{v.sat}$ on vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa].

Ensimmäinen termi yhtälön oikealla puolella edustaa nestemäisen veden kapillaarista siirtymistä. Jälkimmäinen termi yhtälön oikealla puolella edustaa vesihöyryn siirtymistä diffuusiolla. Yhdistämällä kaavat (46) ja (47) saadaan yhdistetyksi lämmön ja kosteuden siirtymisen kosteuden differentiaaliyhtälöksi

$$\xi \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla * -(\xi D_w \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{v.sat}(T))) = G, \quad (48)$$

missä ξ on kosteuskapasiteetti [kg/m^3],
 ϕ on suhteellinen kosteus [-],
 t on aika [s],
 D_w on kapillaarikerroin [m^2/s],
 δ_p on diffuusiokerroin osapaineen avulla [kg/msPa],
 $p_{v,\text{sat}}$ on vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa],
 T on lämpötila [K] ja
 G on kosteudentuotto [$\text{kg/m}^3\text{s}$].

Ajasta riippuva yhdistetty lämmön ja kosteuden siirtymisen ongelma voidaan ratkaista differentiaaliyhtälöiden (45) ja (48) avulla. COMSOL käyttää kyseisiä differentiaaliyhtälöitä ajasta riippuvassa yhdistetyssä lämmön ja kosteuden siirtymisessä rakennusmateriaalien sisällä kuvaamaan ja ratkaisemaan ongelmaa. Kyseisen differentiaaliyhtälöparin ratkaisemiseksi tarvitaan numeerisia menetelmiä.

Rakenteen sisä- ja ulkopinnoilla käytetään omia konvektiivisia lämpö- ja kosteusvoita. Rakenteen sisä- ja ulkopinnoille annetaan COMSOLin käyttämät konvektiiviset reunaehdot lämpö- ja kosteusvoille kaavoilla (25) ja (36). Konvektiivinen lämpövirrantiheys

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T), \quad (49)$$

missä

q_0 on konvektiivinen lämpövirran tiheys [W/m^2],
 h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W/m}^2\text{K}$],
 T_{ext} on ympäröivän aineen lämpötila [K] ja
 T on kiinteän pinnan lämpötila [K].

COMSOLissa pystytään määrittämään konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle pakotetun ja vapaan konvektion arvoja sisäiselle sekä ulkoiselle virtaukselle erilaisten konvektioon vaikuttavien parametrien avulla. Simulointimallia rakennettaessa konvektiiviset lämmönsiirtymiskertoimet annetaan sisä- ja ulkopinnalle sekä mahdollisille ilmaraoille konvektiivisen lämpövirran tiheyttä määrittäessä.

Kosteusvirrantiheys on analyttinen lämpövirrantiheyden kanssa. COMSOLissa kosteusvirran tiheys voidaan määrittää pitoisuus- tai paine-eron avulla. Künzelin mukaan (Künzel 1995, s. 30) paine-eron avulla konvektiivinen kosteusvirran tiheys

$$g_0 = \beta_p(p_{v.ext} - p_v), \quad (50)$$

missä

g_0 on konvektiivinen kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],

β_p on kosteudensiirtymiskerroin [$\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$],

$p_{v.ext}$ on ympäröivän vesihöyryn osapaine [Pa] ja

p_v on vesihöyryn osapaine materiaalin pinnalla [Pa].

Kosteudensiirtymiskertoimet paine-eron kautta laskettaessa voidaan ilmaista vesihöyryn osapaineen tai suhteellisen kosteuden avulla. Kosteudensiirtymiskertoimet määritetään sisä- ja ulkopinnoille sekä mahdollisille ilmaraoille.

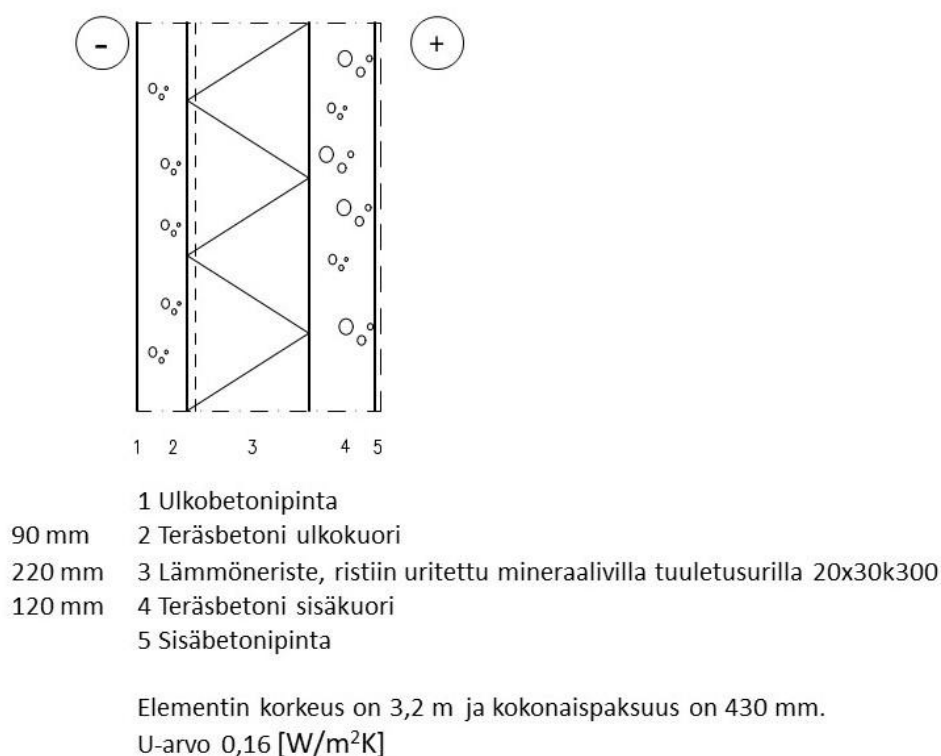
5 SIMULOINTIMALLIT

5.1 Mallinnettavat julkisivurakenteet

Mallinnettavat julkisivurakenteet valittiin toteutuneiden ja kehitystyön alla olevien kohteiden perusteella. Tässä työssä valittiin simuloitaviksi ja mallinnettaviksi julkisivurakenteiksi teräsbetonisandwich-elementti ja kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu. Julkisivurakenteet toimivat sekä julkisivurakenteena, että lämpöä eristävänä rakennekerroksena. Teräsbetonisandwich-elementti toimi myös kuormaa kantavana rakenteena.

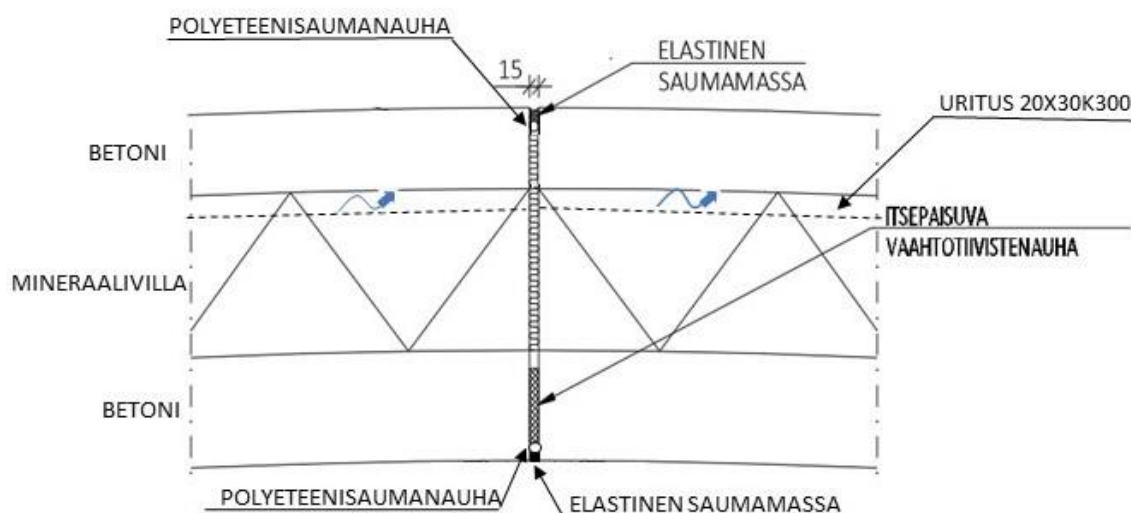
5.1.1 Teräsbetonisandwich-elementti

Tutkittavan teräsbetonisandwich-elementin rakennetyyppi esitettiin Kuvassa 14. Lämmöneristeenä toimiva mineraalivilla oli ulkopinnastaan ristiinuritettu 20x30k300. Ulko- ja sisäpuoleisten betonipintojen pintakäsittelyjä ja pinnoituksia ei simulaatiossa otettu huomioon.



Kuva 14. Tutkittavan betonisandwich-elementin rakennetyyppi.

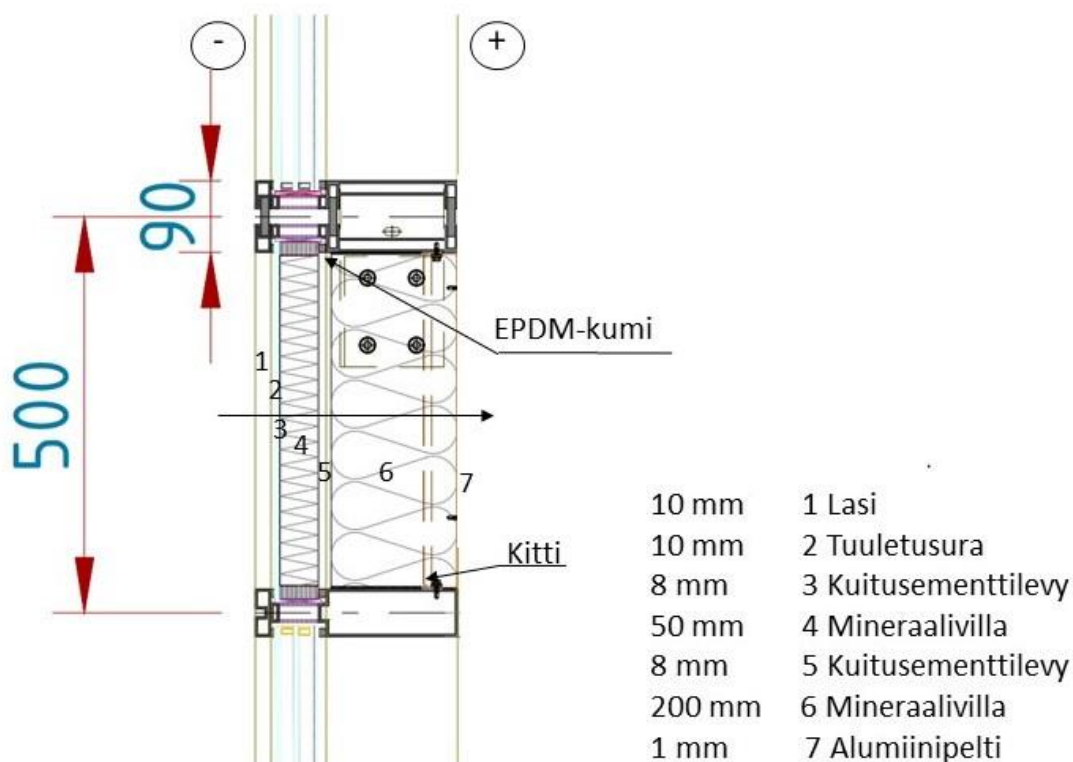
Kuvassa 15 on esitetty kahden betonisandwich-elementin pystysauman leikkaus, jota COMSOL-simulaatiossa tutkittiin kosteusteknisen toiminnan kannalta. Vauriotapauksessa elastisen saumamassan ja polyeteeninauhan vieressä oli pieni 2 mm rako, josta ulkoilman olosuhteet pääsivät konvektiolla rakenteeseen. Raon leveys valittiin mahdollisimman todennukaisesti vastaamaan reaali maailman tilannetta, jossa elastiseen saumamassaan syntyy vaurio työteknisestä asennuksesta tai kutistumisesta johtuen. Elementtien välissä olevaa saumavillakaistaa ei mallinnettu tarkemmin vaan se asetettiin vastaamaan elementtien mineraalivillaa. Elementtien kaarevuutta ei huomioitu geometriassa. Kohdassa 5.3 käydään tarkemmin läpi simuloinnissa käytetty geometria.



Kuva 15. Mallinnettava kahden betonisandwich-elementin pystyliitos.

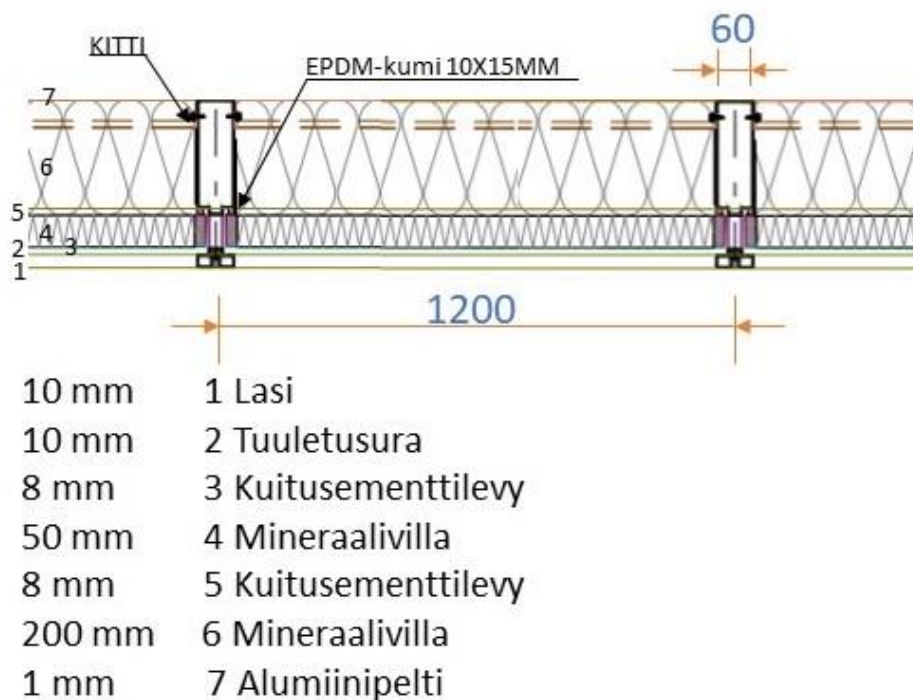
5.1.2 Kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu

Tutkittavan kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun rakennetyyppi on esitetty Kuvassa 16. Kuitusementtilevy mineraalivilla kuitusementtilevy -paketti asennettiin tiiviisti EPDM-kumia ja 200 mm paksua mineraalivillakerrosta vasten, siten että väliin ei jäänyt ilmväliä. Kuvassa näkyvät myös alumiinivaakaprofilit, joiden vasemmassa päässä ovat alumiiniset kiristinruuvit, joilla kuitusementtilevy mineraalivilla kuitusementtilevy -paketti voidaan asentaa tiukasti paksua mineraalivillakerrosta vasten.



Kuva 16. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun pystyleikkaus.

Kuvassa 17 on esitetty rakenteen vaakaleikkaus, jota COMSOL-simulaatiossa tutkittiin kosteusteknisen toiminnan kannalta. Vauriotapauksessa sisäpuolella kitin ja pellin välissä on pieni 2 mm rako, josta sisäilmankosteus pääsi konvektiolla rakenteeseen. Lisäksi lasin ja uloimman kuitusementtilevyn välistä ulkoilman kosteus pääsi virtaamaan mineraalivillakerrokseen EPDM-kumin ja alumiiniosien välisestä 2 mm levyisestä raosta. Rakojen leveydet [mm] valittiin mahdollisimman todennukaisesti vastaamaan reaalimaailmantilannetta, jossa työtekniinen asennus on tehty huolimattomasti. Symmetrian hyväksikäyttöä geometriassa ja vauriotapauksien geometriaa käydään läpi tarkemmin kohdassa 5.4.



Kuva 17. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun tutkittava vaakaleikkaus.

5.2 Simulointimallien yhteiset määrittelyt

5.2.1 COMSOL Multiphysics -simulointiohjelma

Tässä diplomityössä käytettiin tutkittavien rakenteiden simulointiin ja analysointiin COMSOL Multiphysics -simulointiohjelmistoa. COMSOL Multiphysics on multifysiikka simulointiohjelmisto, jossa voidaan simuloida ja analysoida erilaisia fysikaalisia ilmiöitä ja ongelmia erilaisissa ulottuvuuksissa elementtimenetelmään pohjautuen. Tässä työssä valittiin simuloitavaksi ulottuvuudeksi 2D. Tämä valinta johtui ongelman luonteesta, geometriasta ja laskenta-aikojen minimoimisesta. Tutkittavaksi fysiikaksi simulointiin valittiin Heat Transfer -valikosta Heat and Moisture Transport in Building Materials. Simuloinnit valittiin suoritettaviksi ajasta riippuvana laskentana eli time dependent, koska lukuisat simuloitavan ongelman parametrit muuttuvat ajan suhteen sekä itse ongelman luonne on ajasta riippuva.

5.2.2 Materiaaliominaisuudet

Tietokonesimulointien tuloksien todenmukaisuus riippui vahvasti ohjelmaan syötetyistä materiaaliparametreistä, jos simulointi oli muilta osin onnistunut. Rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan luotettava tarkastelu vaati materiaaliparametrien selvittämistä kosteuspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden funktiona. Materiaaliparametrien todenmukaisen käyttäytymisen tunteminen kosteuden- ja lämpötilanmuutoksien funktiona oli tärkeässä asemassa simulointia määrittäessä, jotta muuttuvassa ilmastollisessa kuormituksessa saatiin tarkkoja ja todenmukaisia tuloksia. COMSOLin tarvitsemat materiaaliparametrit ajasta riippuvassa yhdistetyssä lämpö- ja kosteussimuloinnissa esitetään alla olevassa Taulukossa 4.

Taulukko 4. COMSOLin tarvitsemat materiaaliparametrit ajasta riippuvassa lämmön ja kosteuden siirtymisessä.

| | |
|---|--------------------------------|
| Lämmönjohtavuus (riippuu kosteuspitoisuudesta) | $\lambda(w)$ [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys | ρ [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti | C_p [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin | μ [-] |
| Kapillaarikerroin (riippuu kosteuspitoisuudesta) | $D_w(w)$ [m ² /s] |
| Hygroskooppinen tasapainokosteus (riippuu suhteellisesta kosteudesta) | $w(\phi)$ [kg/m ³] |

Lakentatarkasteluissa käytettiin pelkästään kuivissa olosuhteissa eli suhteellisen kosteuden ollessa alle 70 % määritettyjä materiaalien vesihöyrynläpäisevyyden δ_p arvoja, joissa oli vain mukana diffuusion vaikutus. Kosteuspitoisuuden muutos korkeammilla arvoilla otettiin huomioon kapillaarisessa kosteudensiirtymisessä kapillaarisella alueella kapillaarikertoimen avulla $D_w(w)$. (RIL 255-1 2014, s. 352 & s. 395.)

Diffuusiovastuskertoimen μ laskennassa kaavalla (30) käytettiin ilman vesihöyryläpäisevyydelle vakioarvoa $\delta_{p,ilma} = 188 \cdot 10^{-12}$ [kg/(msPa)]. Ilman vesihöyryläpäisevyyden arvo oli mitattu 23 °C lämpötilassa. (RIL 255-1 2014, s. 395.)

Ilmalle käytettiin COMSOLin esiasetettuja Air-materiaaliominaisuuksia. Adsorption tasapainokäyriä käytettiin kuvaamaan materiaalien kosteuden varastoitumis- ja kuivumiskykyä eikä desorption tasapainokäyriä käytetty. Konvektiivisina lämmön ja kosteuden siirtymiskertoimina rakenteiden sisä- ja ulkopinnoille käytettiin Taulukon 2 ja Taulukon 3 mukaisia arvoja. Arvoina käytettiin vakioarvoja.

Liitteessä 1 esitetään materiaaliikohtaiset parametrien arvot, joita käytettiin simulaatioissa. Materiaaliominaisuuksien riippuvuus kosteuspitoisuudesta tai suhteellisesta kosteudesta esitettiin taulukkomuodoissa, mitkä COMSOLiin tuotaessa lineaarisesti interpolointiin mittauspisteiden välillä.

5.2.3 Valitut ulko- ja sisäilman olosuhteet

Simuloinnissa ulkoilman olosuhteina käytettiin Ilmatieteen laitoksen tulevaisuuden rakennusfysikaalista Vantaan 2030 testivuotta. Ilmastodata oli julkisesti saatavilla Ilmatieteenlaitoksen nettisivulta: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-testivuodet-tulevaisuuden-ilmastossa>. Ilmastodata oli saatavilla tekstitiedostona, jossa oli eritelty mitatut suureet sarakkeittain. Ilmastodatan tekstitiedosto sisälsi tunneittain muuttuvat mitatut arvot sademäärälle [mm/h], säteilylle [W/m²], tuulen suunnalle [°] ja tuulen nopeudelle [m/s] sekä ulkoilman suhteelliselle kosteudelle [%] ja ulkoilman lämpötilalle [°C]. (Ilmatieteenlaitos 2020a; Savolainen 2018, s. 57.)

Sisäolosuhteiden lämpötilaksi määrättiin vakioarvo 21 °C. Sisäilman suhteelliselle kosteudelle määritettiin arvot sisäilman kosteus lisän ja ulkoilman suhteellisen kosteuden avulla. Ulkoilman suhteellinen kosteus ja ulkoilman lämpötila saatiin rakennusfysikaalisten testivuosien ilmastodatasta. Sisäilman suhteellinen kosteus laskettiin ilmastodatan, vesihöyryn osa- ja kyllästyspaineen avulla. Sisäilman suhteellisen kosteuden laskenta esitetään Liitteessä 2.

Viistosade otettiin huomioon korkean rakentamisen olosuhteissa kasvattamalla tuulen nopeutta. Viistosade laskettiin Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden ilmastodatan perusteella. Viistosateen laskenta esitetään Liitteessä 3.

5.2.4 Reunaehdot ja rajoitukset

Konvektio otettiin simuloinneissa huomioon lämmön- ja kosteudensiirron reunaehdoissa rakenteiden ulko- ja sisäpinnoilla sekä rakenteiden tuuletusväleissä. Rakenteet ja materiaalit oletettiin muuten olevan ilmatiiviitä, joissa lisäksi ei tapahdu sisäistä konvektiota. Mallinnuksessa käytettiin Taulukon 5 mukaisia reunaehtoja.

Taulukko 5. Mallinnuksessa käytettävät reunaehdot ja rajoitukset.

| |
|--|
| Lämmön ja kosteuden siirtymisen konvektioreunaehdot kaavoilla (25) ja (36) ulko- sekä sisäpinnoille |
| Symmetriareunaehdot rakenteiden jatkuville sivuille |
| Adiabaattiset ja kosteustiiviit rakenteiden ylä- ja alapinnat |
| Tuuletusuran tuloilmavirtauksen nopeus $v = 0,1 \text{ m/s}$, lämpötila T_{ext} ja suhteellinen kosteus ϕ_{ext} |
| BSW-elementin vauriotapauksessa ilmavirtauksen nopeus ulkokuoren pystysauman vaurioraossa $v = 0,3 \text{ m/s}$, lämpötila T_{ext} ja suhteellinen kosteus ϕ_{ext} |
| Rakennusfysikaaliset testivuosi kuormitukset ulko- ja sisäpinnoille: T_{ext} , ϕ_{ext} , viistosade, T_{in} ja ϕ_{in} |
| Materiaalien sisäistä konvektiota ei tapahdu |

| |
|---|
| Kosteus siirtyy diffuusiolla ja kapillaarisesti materiaaleissa sekä konvektiolla ilmaraossa, painovoimaista kosteuden siirtymistä ei oteta huomioon |
| Lämpö siirtyy johtumalla materiaaleissa ja konvektiolla ilman mukana. Faasimuutoksen latenttilämpö otetaan huomioon. Lämmönsiirtymistä säteilemällä ei huomioida. |

Betonin alkukosteuspitoisuutena käytettiin simulaatiossa 85 % suhteellista kosteutta vastaavaa kosteuspitoisuutta. 95 % suhteellinen kosteuspitoisuus tavallisesti vallitsee juuri työmaalle toimitetuissa betonisandwich-seinäelementeissä (Vinha ym. 2013, s. 148). Muiden materiaalien alkukosteuspitoisuutena käytettiin 80 % suhteellista kosteutta vastaavaa kosteuspitoisuutta (Savolainen 2018, s. 63). Tuuletusurassa virtaavalle kostealle ilmalle käytettiin alkukosteuspitoisuutena suhteellisen kosteuden arvoa 99 %, joka vastaa Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden ilmastodatan ensimmäistä ulkoilman suhteellisen kosteuden arvoa.

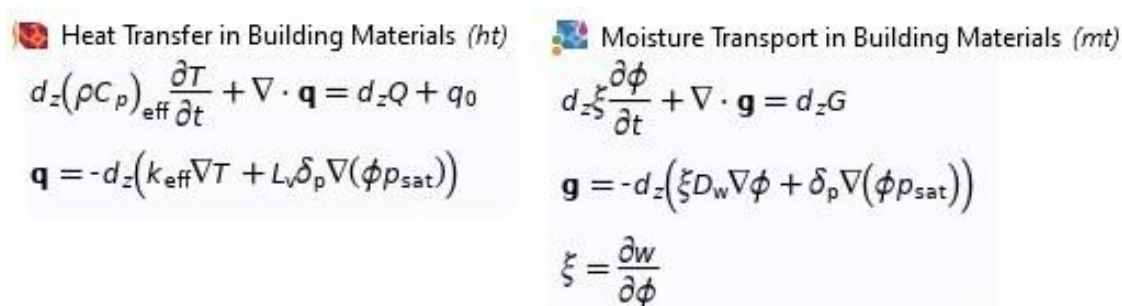
Betonisandwich-rakenteessa mineraalivillan, sisäbetonikuoren, sisäpuoleisen saumamassan ja -nauhan sekä vaahtotiivistäenauhan lämpötila alussa asetettiin 21 °C:een. Ulkobetonikuoren, saumamassan ja -nauhan sekä tuuletusurassa virtaavan ilman lämpötila asetettiin Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden datan alkulämpötilaan eli 3,6 °C:een.

Kevytrakenteisessa järjestelmäjulkisivussa sisemmän kuitusementtilevyn ja sen sisemmille materiaaleille asetettiin alkulämpötilaksi 21 °C. Sitä ulommille materiaaleille ja tuuletusvälin ilmalle asetettiin lämpötilaksi Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden datan alkulämpötila eli 3,6 °C.

5.2.5 Simuloinneissa käytettävät lämmön ja kosteuden siirtymistavat

COMSOL-simulaatioissa kosteuden siirtymisyhtälönä käytettiin (12):sta, (46):sta ja (47):sta yhdistettyä differentiaaliyhtälöä (48). Lämmön siirtymisyhtälönä käytettiin (43):sta ja (44):sta yhdistettyä differentiaaliyhtälöä (45). Rakenteiden ulko- ja

sisäpinnoilla käytettiin lämmön (25) ja kosteuden siirtymisen (36) konvektioreunaehtoja. COMSOLin multiphysics-modulilla yhdistettiin lämmön ja kosteuden siirtymisen yhtälöt keskenään sekä lisättiin faasimuutoksen latenttilämmön vaikutukset pinnoille. Näin saatiin kappaleen 4.5 mukaiset yhdistetyt lämmön ja kosteuden siirtymisen kaavat. Kuvassa 18 esitetään COMSOL-ohjelman simuloinneissa käytetyt yhtälöt. Lämmönsiirtymisen ylemmässä tasapainoyhtälössä lämmönlähde termi Q oli tässä simulaatiossa 0. Kosteudensiirtymisen ylimmässä tasapainoyhtälössä termi G oli viistosateen aiheuttama kuormitus julkisivuille, mikä tuotiin COMSOLiin erikseen laskettuna tekstitiedostona.



Heat Transfer in Building Materials (ht)

$$d_z(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0$$

$$\mathbf{q} = -d_z(k_{\text{eff}} \nabla T + L_v \delta_p \nabla(\phi p_{\text{sat}}))$$

Moisture Transport in Building Materials (mt)

$$d_z \xi \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{g} = d_z G$$

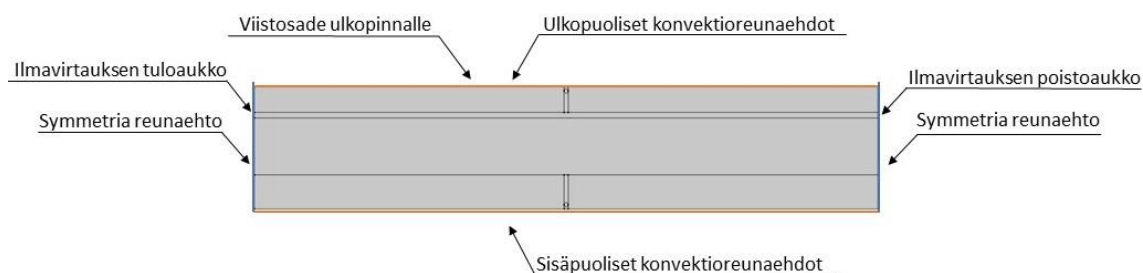
$$\mathbf{g} = -d_z(\xi D_w \nabla \phi + \delta_p \nabla(\phi p_{\text{sat}}))$$

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial \phi}$$

Kuva 18. COMSOLin käyttämät lämmön ja kosteuden siirtymisen yhtälöt.

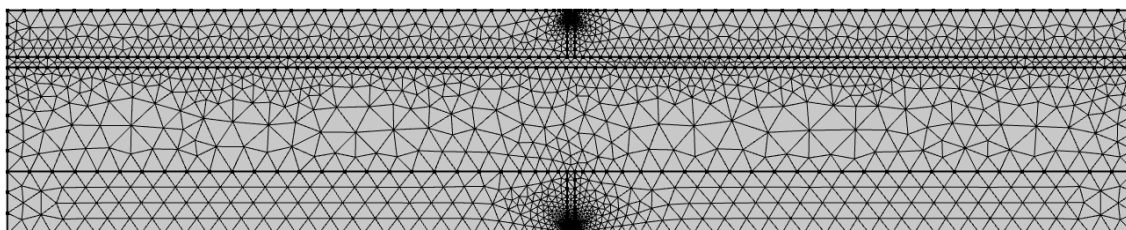
5.3 Betonisandwich-elementin simulointi

Ehjän betonisandwich-elementin COMSOL-simulaatiossa käytettiin Kuvan 19 mukaista geometriaa ja reunaehtoja. Leikkaus otettiin vaakaurituksen kohdalta, jolloin pystyttiin määrittämään malliin ilman virtaus tuuletusurassa. Materiaaliominaisuudet asetettiin vastaamaan Kuvan 15 materiaaleja. Ulko- ja sisäpuoleiset konvektiiviset lämpö- ja kosteusvirrat asetettiin rakenteiden ulko- ja sisäpuolille. Symmetria reunaehdot asetettiin rakenteen jatkuville sivuille. Ilman virtauksen nopeus, tuloaukko ja poistoaukko lisättiin malliin. Viistosade kuormitus lisättiin ulkokuoren ulkopinnalle Liitteessä 3 lasketulla tavalla. Lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle käytettiin kappaleen 5.2.4 lopussa valittuja alkuarvoja.



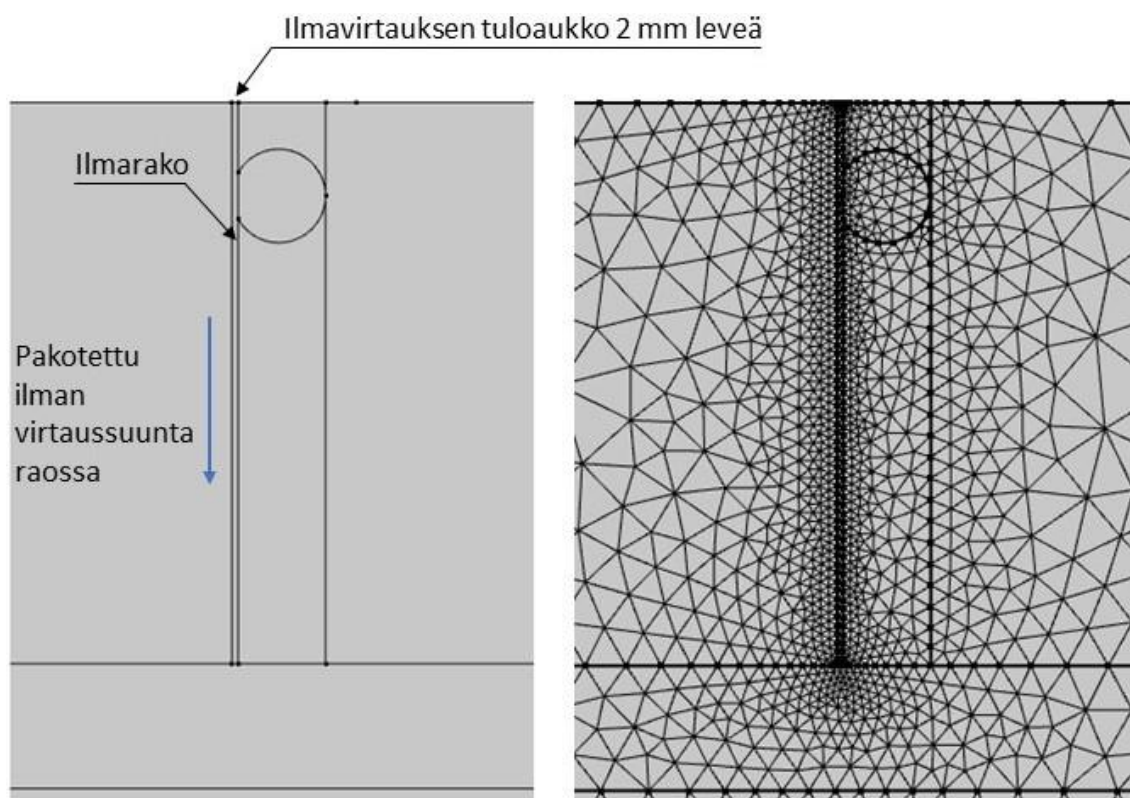
Kuva 19. Mallinnettu geometria ja käytetyt reunaehdot.

Elementtiverkkona käytettiin käyttäjän itse määrittämää kolmioelementtiverkkoa, jota optimoitiin minimoimalla elementtien määrää herkkyystarkastelujen pohjalta. Elementtiverkkoa harvennettiin laskenta-ajan minimoimiseksi. Elementtiverkon tiheyden ja tuloksien tarkkuuden herkkyystarkastelu käydään läpi kappaleessa 6.1. Kuvassa 20 esitetään simuloinnissa käytetty elementtiverkko. Jokaiselle materiaalipaksuudelle määritettiin ominainen elementtiverkon tiheys.



Kuva 20. BSW-elementtirakenteen elementtiverkko.

Vauriotapauksessa geometriaan lisättiin ulkokuoren pystysauman kohdalle 2 mm levyinen ilmarako, josta ulkoilma pääsee virtaamaan rakenteeseen 0,3 m/s nopeudella. Mallinnettu ilmarako, sen reunaehdot ja elementtiverkko esitetään Kuvassa 21. Muuten geometria ja elementtiverkon tiheys pidettiin samana kuin vaurioitumattomassa tapauksessa Kuvan 19 ja Kuvan 20 mukaisesti.



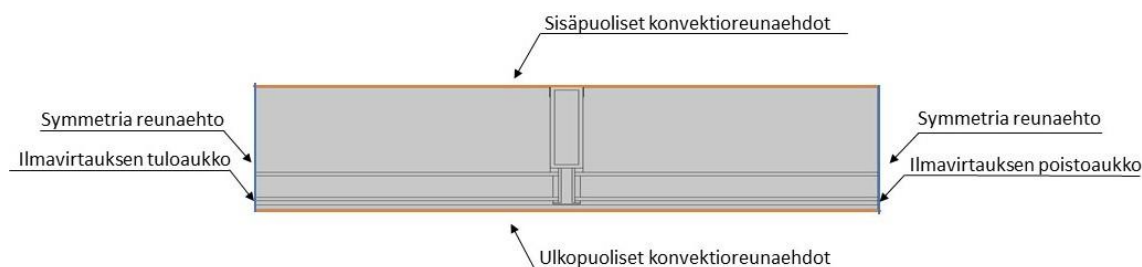
Kuva 21. Ilmaraon geometria ja elementtiverkko vauriotapauksessa.

Ajasta riippuva laskenta suoritettiin yhden vuoden ajalta tunnin aika-askeleella. COMSOLin ajasta riippuvan ratkaisijan numeerisena menetelmänä käytettiin implisiittistä Backward Differentiation Formulaa eli BDF:ää, joka antaa sileitä tuloksia eli vaimentaa korkeita arvoja. BDF soveltuu hyvin erilaisiin fluidin liikkeitä ja siirtymistä simuloiviin mallinnuksiin.

5.4 Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun simulointi

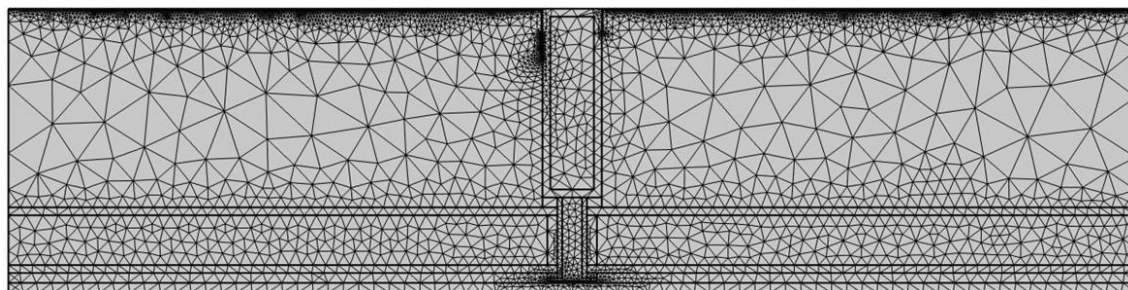
Vauriottoman kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun simuloinnissa käytetään Kuvan 22. mukaista geometriaa ja reunaehtoja. Materiaaliominaisuudet asetettiin vastaamaan Kuvan 17 materiaaleja. Ulko- ja sisäpuoleiset konvektiiviset lämpö- ja kosteusvirrat asetettiin rakenteiden ulko- ja sisäpuolille. Symmetria reunaehdot asetettiin rakenteen jatkuville sivuille. Ilman virtauksen nopeus, tuloaukko ja poistoaukko lisättiin malliin. Viistosade kuormitusta lasipinnalle ei lisätty, koska lasi ei ole hygroskooppisesti tai kapillaarisesti aktiivinen materiaali, ja näin viistosade kuormitus ei pääse imeytymään rakenteeseen.

Lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle käytettiin kappaleen 5.2.4 lopussa valittuja alkuarvoja.



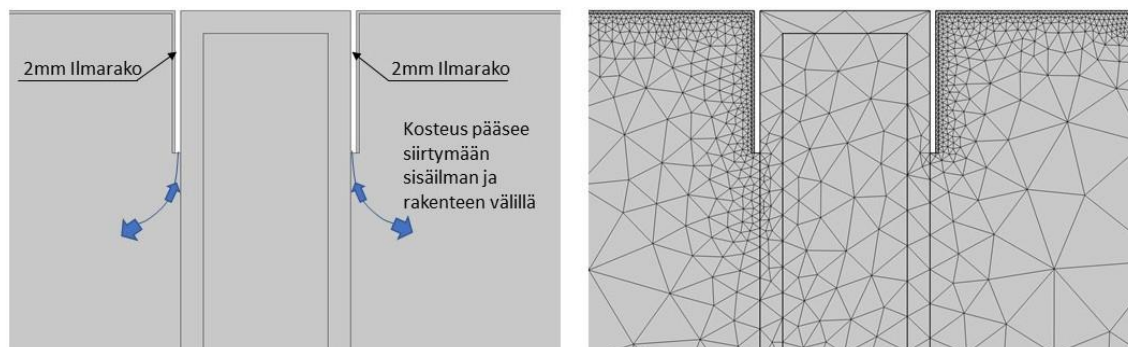
Kuva 22. Mallinnettu geometria ja käytetyt reunaehdot.

Elementtiverkkona käytettiin kolmioelementtiverkkoa, jota optimoitiin minimoimalla elementtien määrää herkkyystarkastelujen pohjalta. Jokaiselle materiaalipaksuudelle määritettiin riittävä elementtiverkon tiheys. Elementtiverkkoa harvennettiin laskenta-ajan minimoimiseksi. Elementtiverkon tiheyden ja tuloksien tarkkuuden herkkyystarkastelu käytiin läpi kappaleessa 6.1. Kuvassa 23 esitetään simuloinnissa käytetty elementtiverkko.



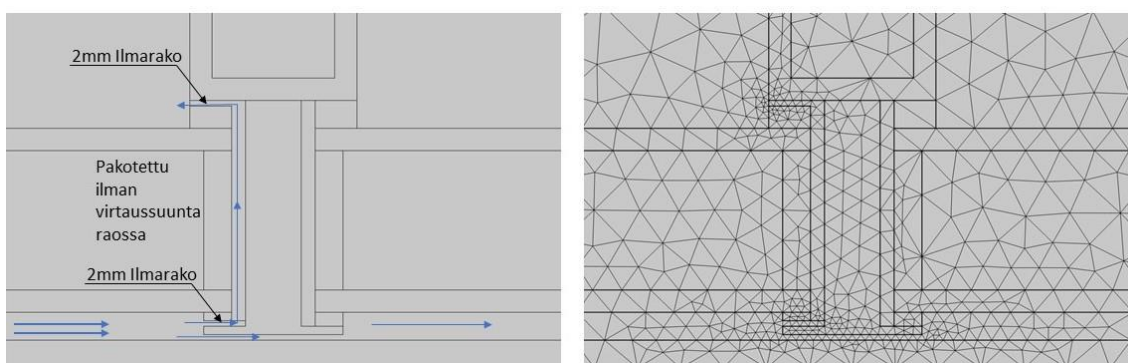
Kuva 23. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun elementtiverkko.

Vauriotapauksessa peltiprofiilin ja pystyalumiiniprofiilin väliin mallinnettiin 2 mm levyinen rako, josta sisäilman kosteus pääsi kosketukseen rakenteen paksun mineraalivillakerroksen kanssa. Kuvassa 24 on esitetty raon geometria ja elementtiverkko sen ympärillä.



Kuva 24. Rakenteen sisäpuoleisten vauriotapauksien geometria ja elementtiverkko.

Lisäksi EPDM-kumien ja alumiiniprofiilien väleihin toiselle puolelle mallinnettiin 2 mm raot, josta tuuletusraossa virtaava kostea ja viileä ilma pääsi kosketuksiin paksun mineraalivillakerroksen kanssa. Tuuletusvälistä rakenteen sisään kulkeutuva ilmarako mallinnettiin vain toiselle puolelle alumiiniprofiilin päätypalaa. Kuvassa 25 on esitetty vauriotapauksen geometria.



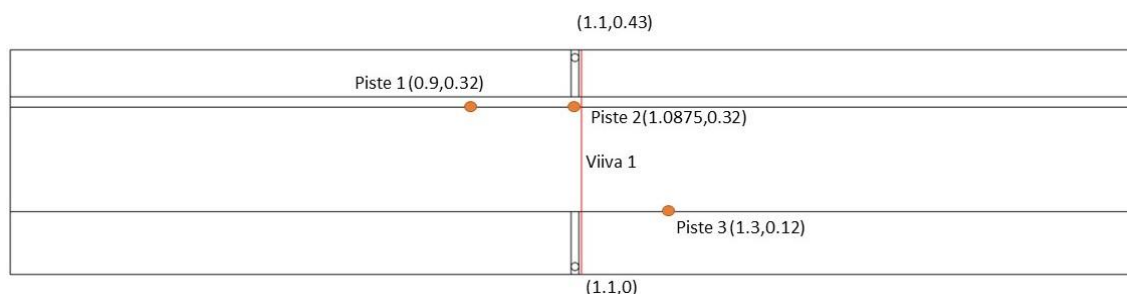
Kuva 25. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun ulkopuolisen vauriotapauksen geometria ja elementtiverkko.

Vauriotapauksessa rakenteen geometria ja elementtiverkon tiheys pidettiin muilta osin samana kuin ehjässä tapauksessa Kuvan 22 ja Kuvan 23 mukaisesti. Sisäpuoleiset konvektioreunaehdot annettiin vauriotapauksessa lisäksi sisäpuoleisten rakojen reunoille.

Ajasta riippuva laskenta suoritettiin yhden vuoden ajalta tunnin aika-askeleella. COMSOLin ajasta riippuvan ratkaisijan numeerisena menetelmänä käytettiin implisiittistä Backward Differentiation Formulaa eli BDF:ää, joka antaa sileitä tuloksia eli vaimentaa korkeita arvoja. BDF soveltuu hyvin erilaisiin fluidin liikkeitä ja siirtymistä simuloiviin mallinnuksiin.

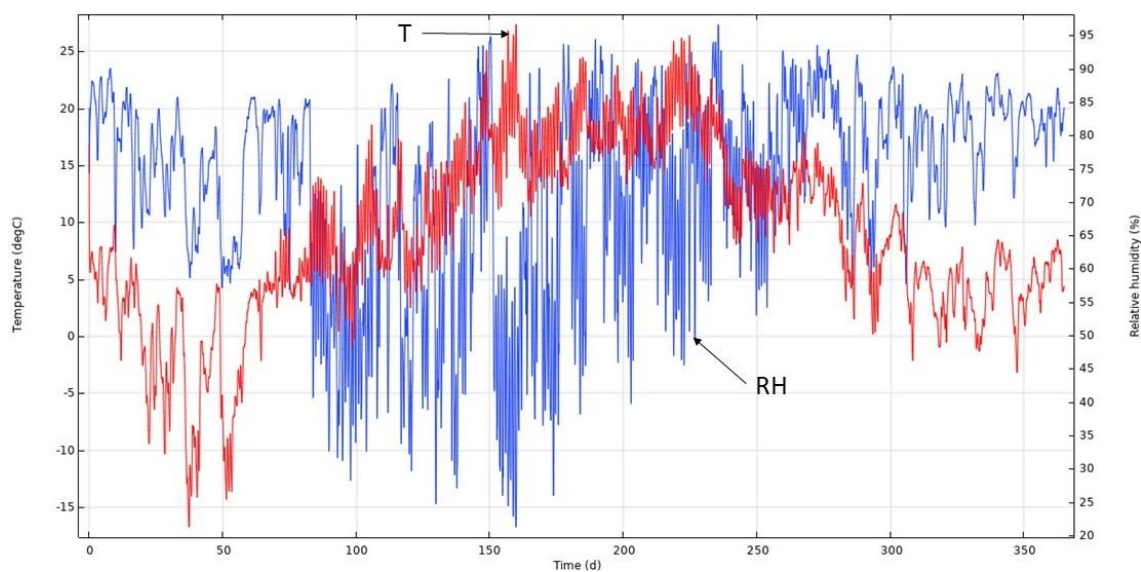
5.5 Betonisandwich-elementin tulokset

Betonisandwich-elementin tuloksien tarkastelukohdiksi valittiin Kuvan 26 mukaiset pisteet ja viivat. Pistekohdista tulostettiin suhteellinen kosteus ja lämpötila ajanfunktiona. Viivakohdista tulostettiin suhteellinen kosteus ja lämpötila viivan pituuden funktiona valituilta ajanhetkiltä. Tarkastelupisteet valittiin rakenteen kosteusteknisen toimivuuden ja homehtumisherkkyuden kriittisyyden perusteella mineraalivillan ja betonin rajapintaan. Rakenteissa homeen kasvua yleensä esiintyy kahden materiaalin rajapinnassa. Lisäksi mineraalivilla oli kyseisessä rakenteessa homehtumisherkin materiaali. Mineraalivillakerroksen ulkopuolella lämpötila vaihtelut olivat suurimpia, joten kosteuden kondensoitumiselle mineraalivillakerroksen ulkoreunaan oli hyvät edellytykset. Lisäksi tuuletusuran tuloilmalla oli ulkoilman olosuhteet, joten oli mielenkiintoista nähdä ilmavirtauksen vaikutus mineraalivillakerroksen suhteelliseen kosteuspitoisuuteen vuoden mittaisen simulaation ajalta. Tarkastelupisteet myös paljastivat mahdollisen kosteuden kerääntymisen rakenteeseen simulaation aikana.

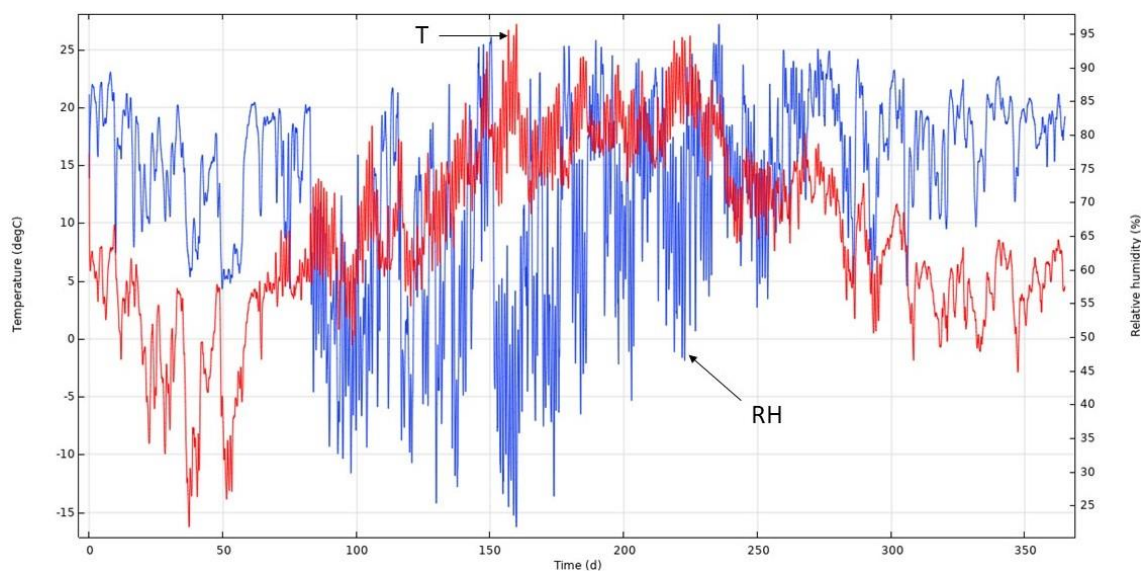


Kuva 26. Betonisandwich-elementin valitut tuloksien tarkastelukohdat ja niiden koordinaatit [m].

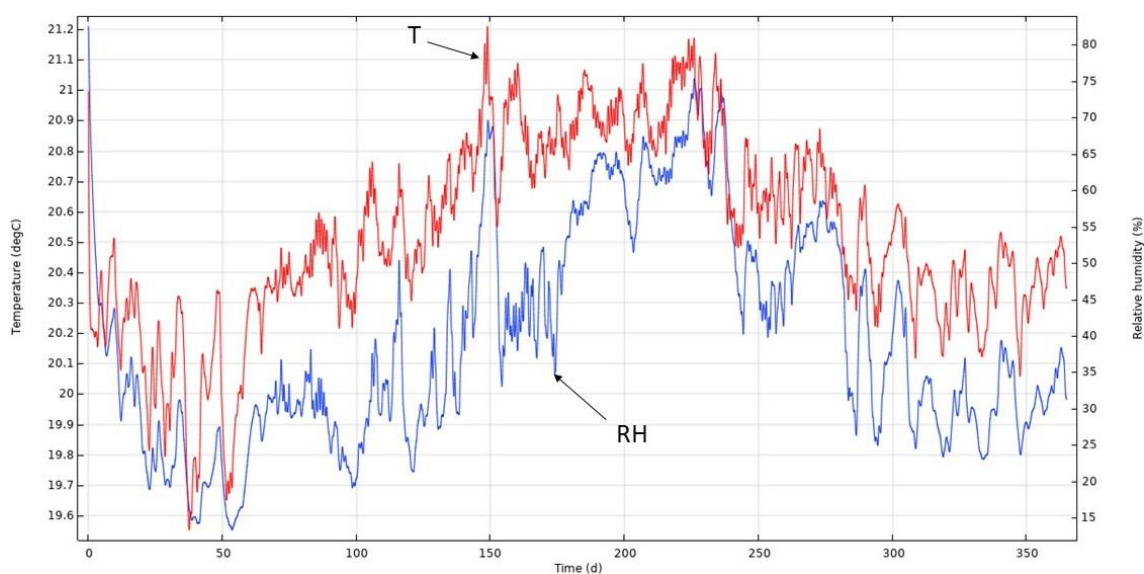
Vauriottomassa tapauksessa BSW-elementin tutkimuspisteiden suhteellinen kosteus ja lämpötila esitettiin vuoden ajalta Kuvissa 27, 28, 29, 30 ja 31. Vasemmanpuoleinen y-akseli kertoi lämpötilan [$^{\circ}\text{C}$] ja oikeanpuoleinen y-akseli suhteellisen kosteuden [%] arvon. X-akseli kertoi ajan [d] lähtien Vantaan rakennusfysikaalisen testivuoden 2030 tammikuun 1. päivästä. Kuvaajissa **lämpötila on esitetty aina punaisella värillä ja suhteellinen kosteus sinisellä.**



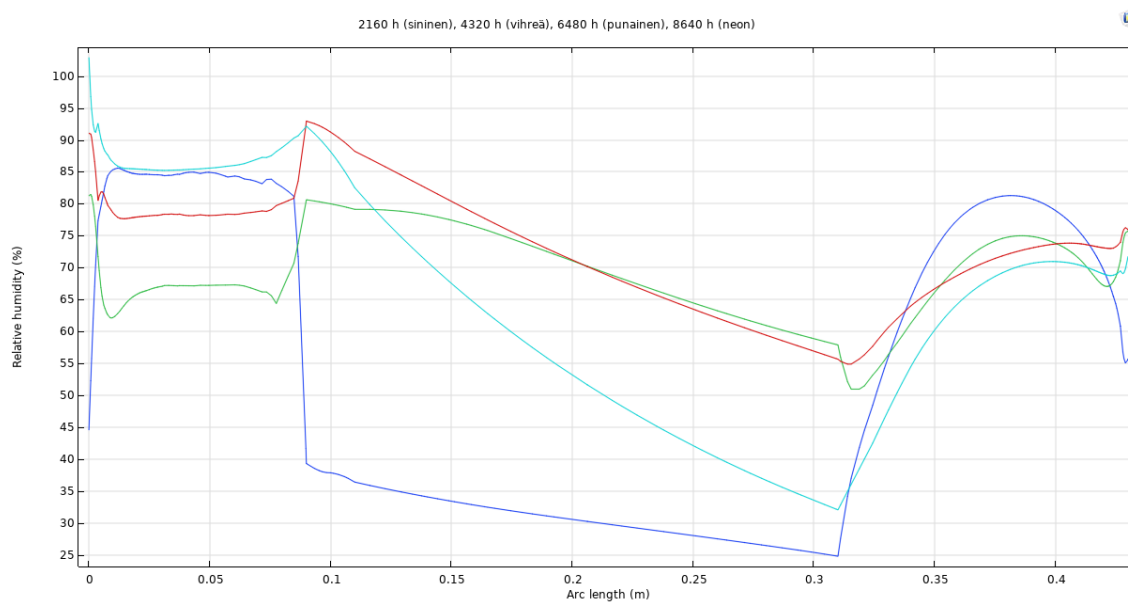
Kuva 27. BSW-elementin Piste 1 suhteellinen kosteus ja lämpötila vuoden ajalta vauriottomassa tapauksessa.



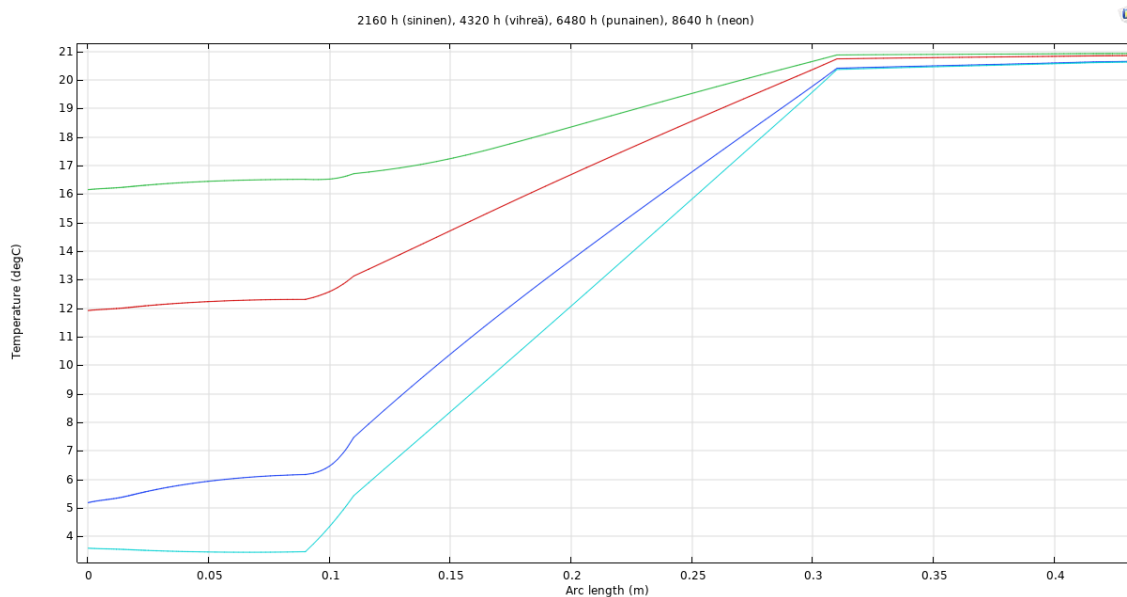
Kuva 28. BSW-elementin Piste 2 suhteellinen kosteus ja lämpötila vuoden ajalta vauriottomassa tapauksessa.



Kuva 29. BSW-elementin Piste 3 suhteellinen kosteus ja lämpötila vuoden ajalta vauriottomassa tapauksessa.

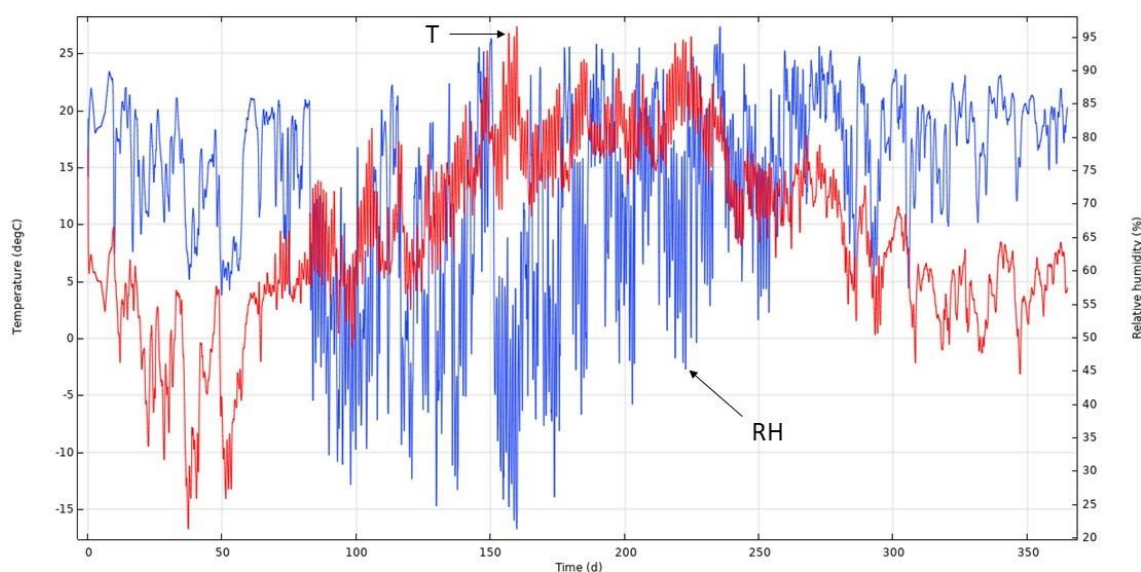


Kuva 30. BSW-elementin suhteellisen kosteuden jakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 1 pitkin vauriottomassa tapauksessa.

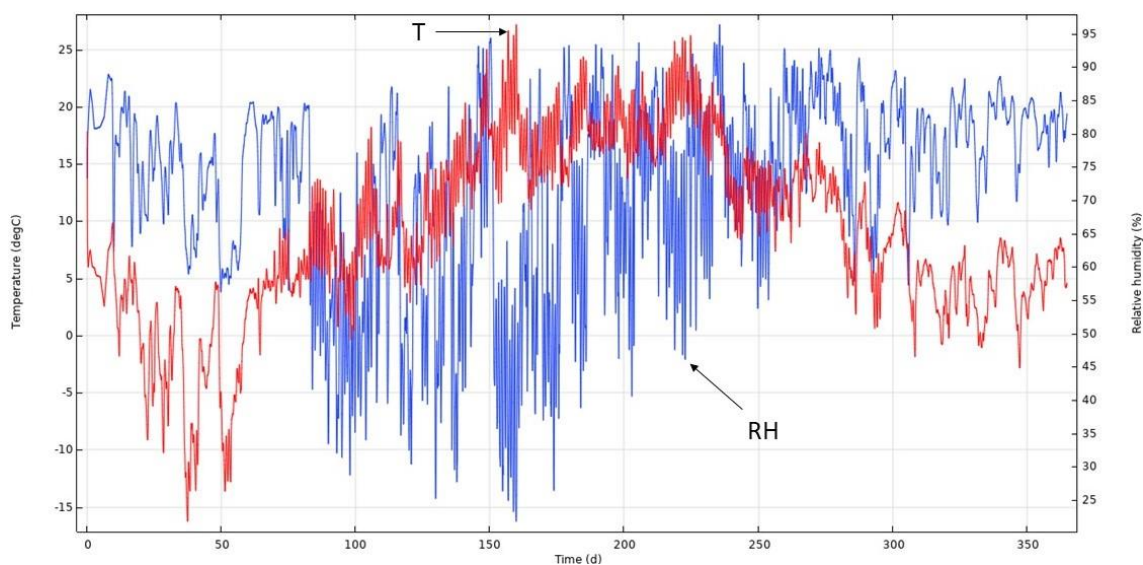


Kuva 31. BSW-elementin lämpötilajakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 1 pitkin vauriottomassa tapauksessa.

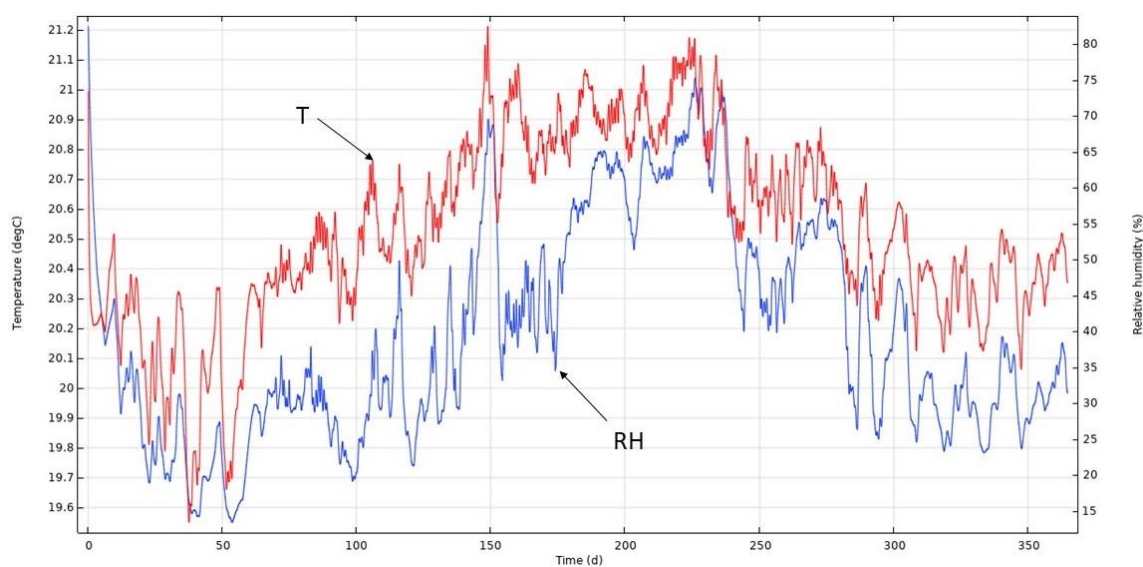
Betonisandwich-elementin vauriotapauksen tutkimuspisteiden tulokset esitettiin Kuvissa 32, 33, 34, 35 ja 36. Betonisandwich-elementin vauriotapauksessa ulkokuoren pystysaumaan mallinnettiin 2 mm leveä ilmarako, josta ulkoilman kosteus ja lämpötila pääsivät siirtymään rakenteen sisään. Ilmavirtauksen nopeus asetettiin 0,3 m/s rakenteen sisäpuolta kohti.



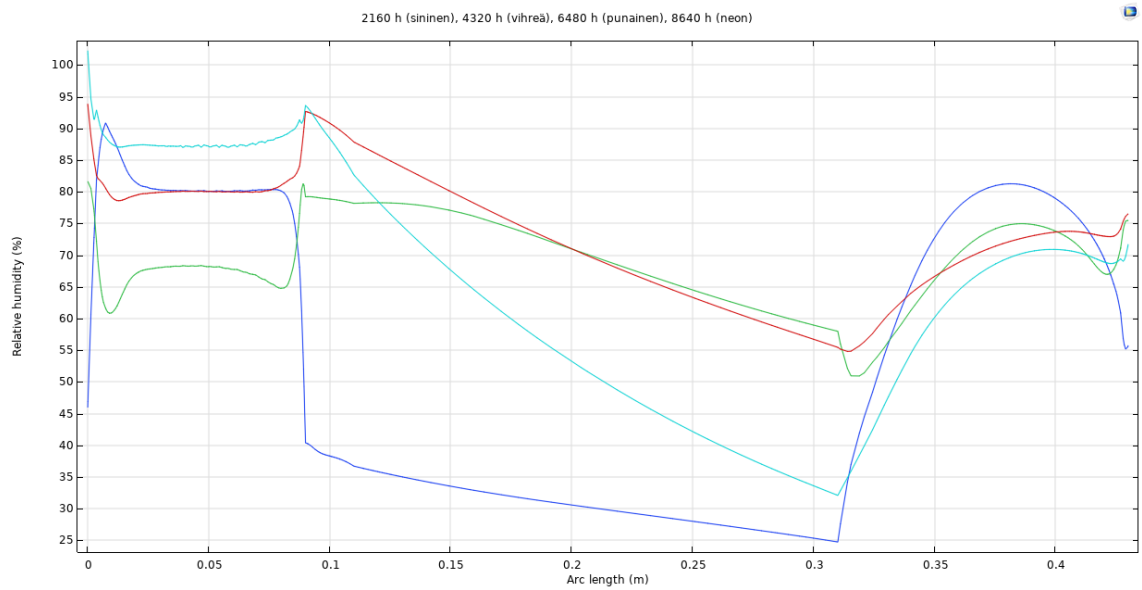
Kuva 32. BSW-elementin Piste 1 suhteellinen kosteus ja lämpötila vuoden ajalta vauriotapauksessa.



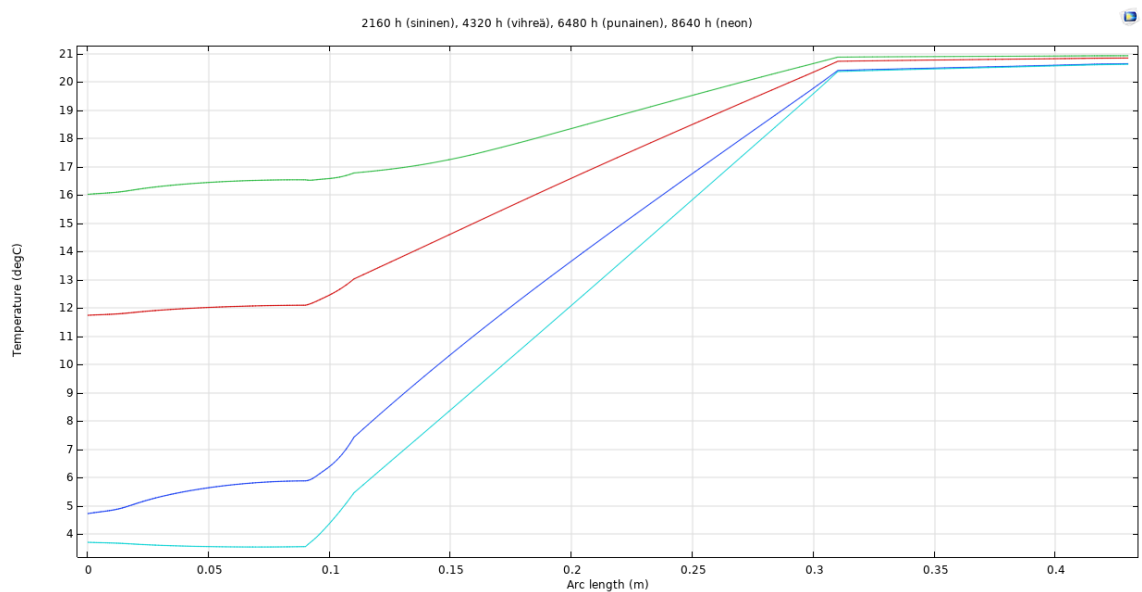
Kuva 33. BSW-elementin Piste 2 suhteellinen kosteus ja lämpötila vuoden ajalta vauriotapauksessa.



Kuva 34. BSW-elementin Piste 3 suhteellinen kosteus ja lämpötila vuoden ajalta vauriotapauksessa.

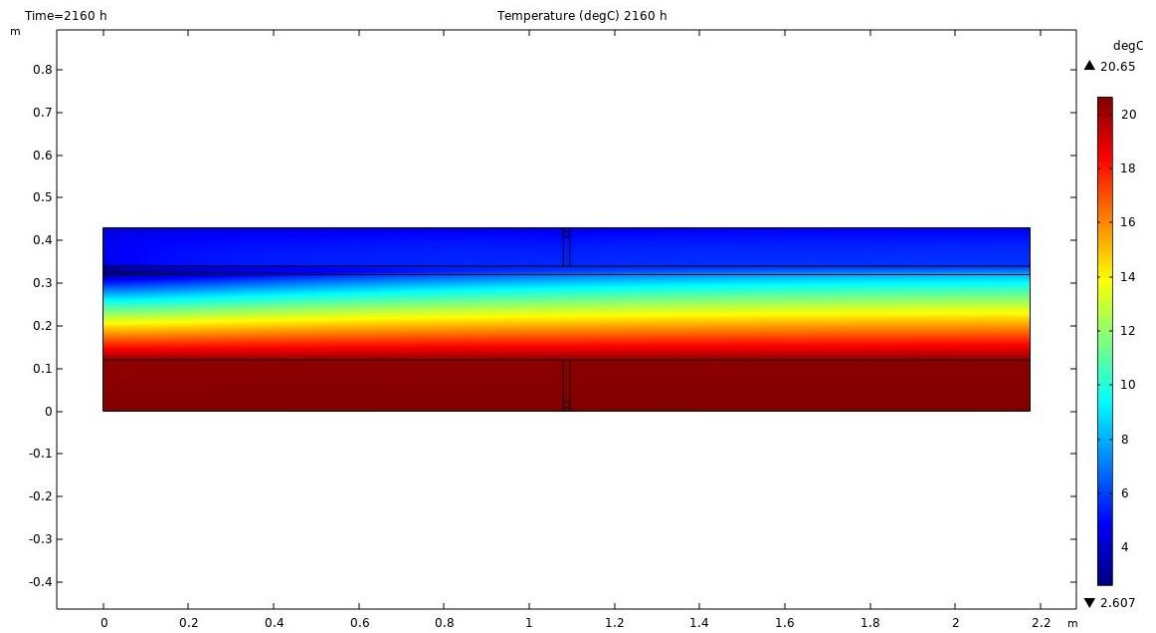


Kuva 35. BSW-elementin suhteellisen kosteuden jakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 1 pitkin vauriotapauksessa.

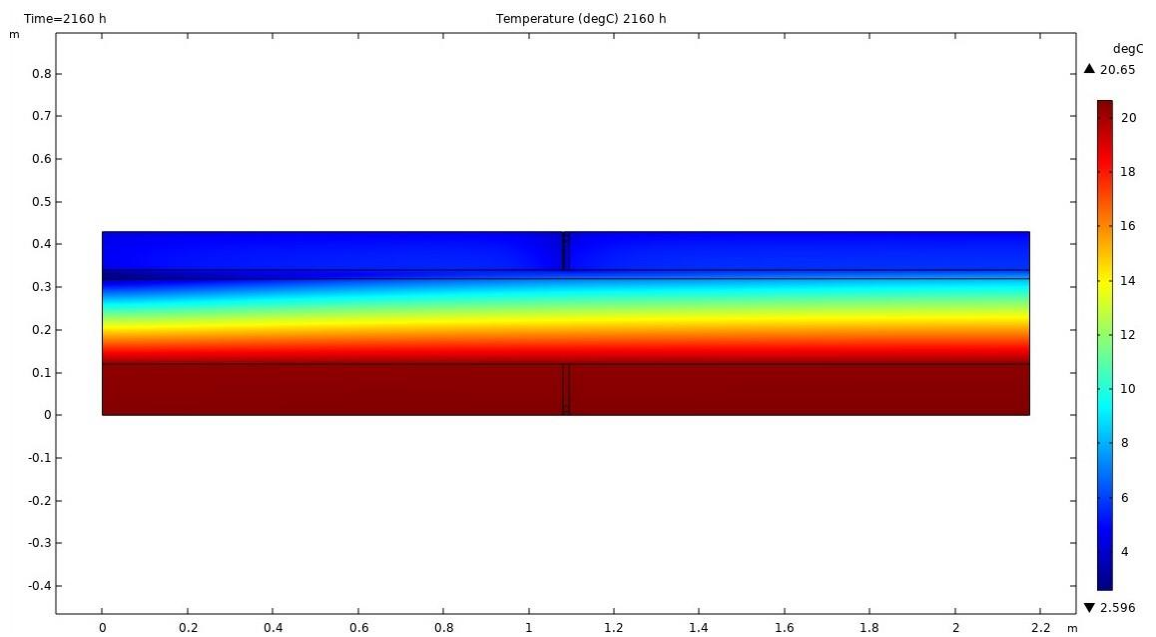


Kuva 36. BSW-elementin lämpötilajakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 1 pitkin vauriotapauksessa.

Kuvassa 37 esitetään betonisandwich-elementin lämpötilajakauma vauriottomassa tapauksessa maaliskuun lopussa. Kuvassa 38 esitetään betonisandwich-elementin lämpötilajakauma vauriotapauksessa maaliskuun lopussa.



Kuva 37. Betonisandwich-elementin lämpötilajakauma vauriottomassa tapauksessa maaliskuun lopussa.

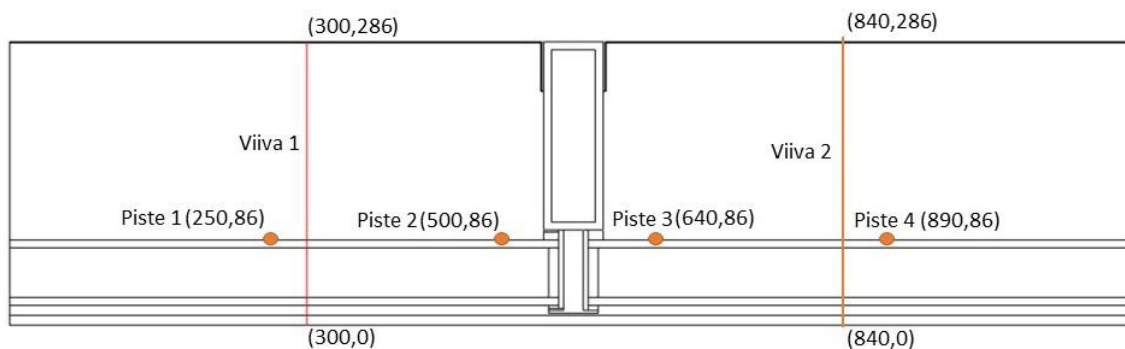


Kuva 38. Betonisandwich-elementin lämpötilajakauma vauriotapauksessa maaliskuun lopussa.

5.6 Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun tulokset

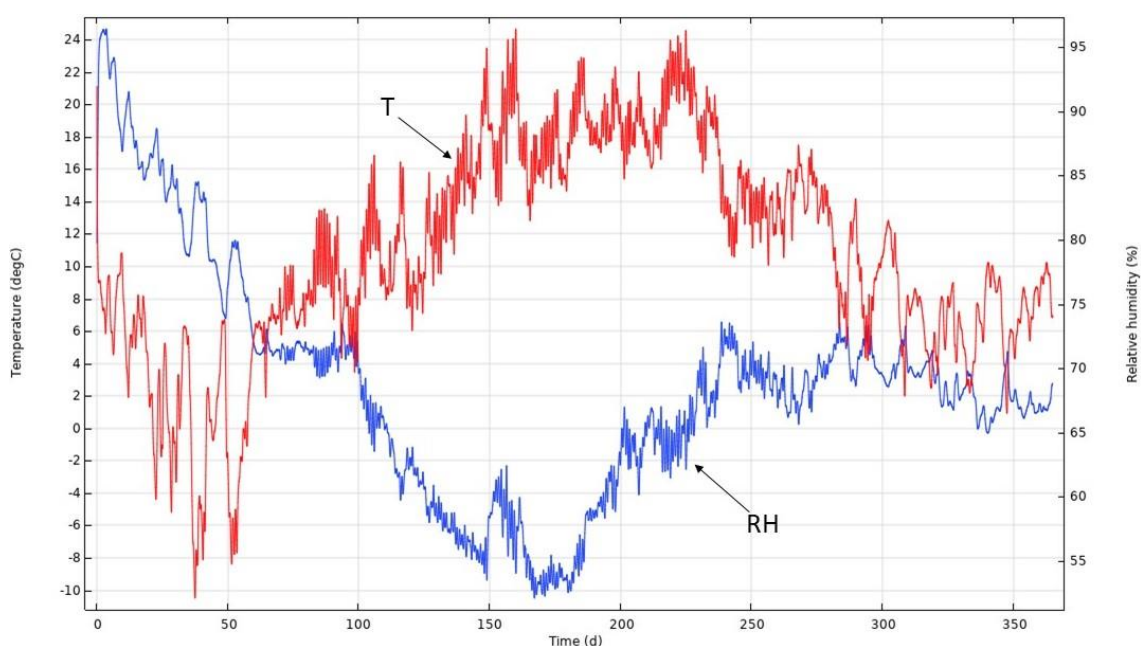
Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun tuloksien tarkastelukohdiksi valittiin vauriotapauksessa Kuvan 39 mukaiset pisteet ja viivat. Vauriottomassa tapauksessa tarkastelukohtina käytettiin pystyalumiinirungon vasemmanpuoleisia pisteitä 1 ja 2 sekä viivaa 1. Pistekohdista tulostettiin suhteellinen kosteus ja lämpötila ajan funktiona. Viivakohdista tulostettiin suhteellinen kosteus ja lämpötila viivan pituuden funktiona valituilta ajanhetkiltä. Viivakohdista tulostetuissa suhteellisen kosteuden kuvaajista skaalattiin ulos lasi ja peltiprofiilin kohdat, koska ne eivät olleet kosteutta imeviä materiaaleja, ja näin ollen niiden suhteellisen kosteuden arvo olisi ollut nolla.

Tarkastelukohdat valittiin rakenteen todennäköisimmän homeutumisherkkyyden perusteella. Rakenteissa homeen kasvua yleensä esiintyy kahden materiaalin rajapinnassa. Lisäksi mineraalivilla oli kyseisessä rakenteessa homeutumisherkin materiaali. Paksun mineraalivillakerroksen ulkopuolella lämpötilavaihtelut olivat suurimpia, joten kosteuden kondensoitumiselle oli hyvät edellytykset, kun lämpötila laski ja absoluuttinen kosteuden määrä pysyi vakiona. Lisäksi mahdollisen homeen kasvun seurauksena, homeitiöt olisivat voineet päästä helpoimmin sisäilmaan sisäpuolisen vaurion kautta ja aiheuttaa sisäilmaongelmia. Sisäpuoleisen vaurion kautta rakenteen sisään pääsevä sisäilman kosteus pääsi suoraan paksuun mineraalivillakerrokseen, joten kyseiset tarkastelupisteet valikoituivat herkullisiksi tarkastelupisteiksi tämänkin ongelman osalta.

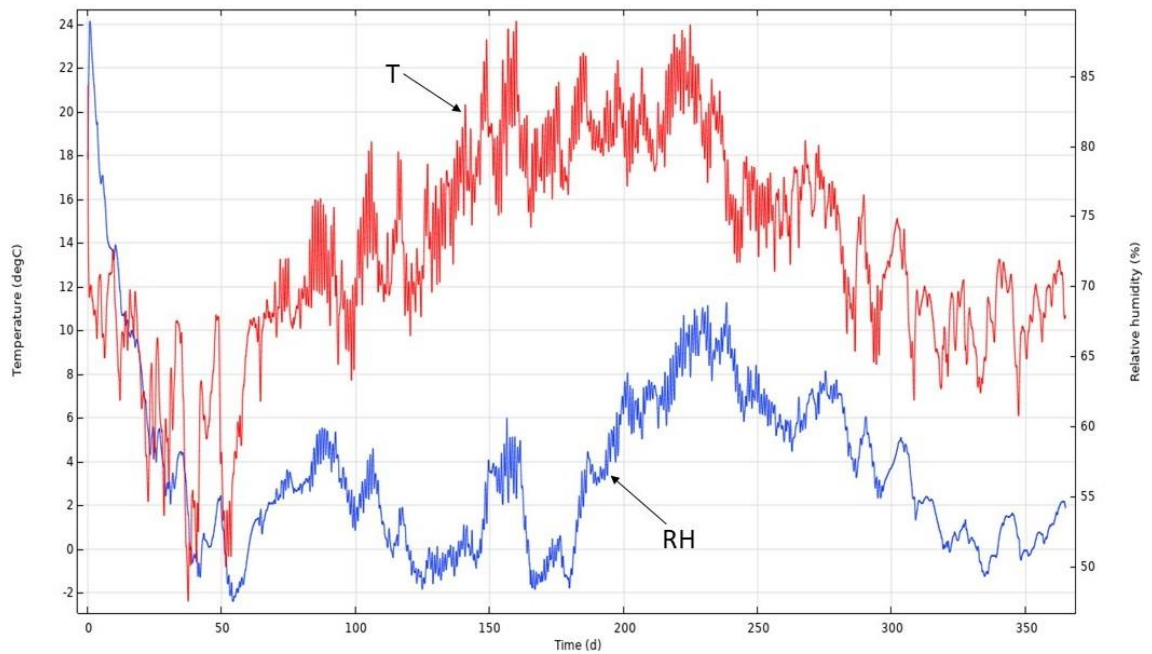


Kuva 39. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun valitut tuloksien tarkastelukohdat ja niiden koordinaatit [mm].

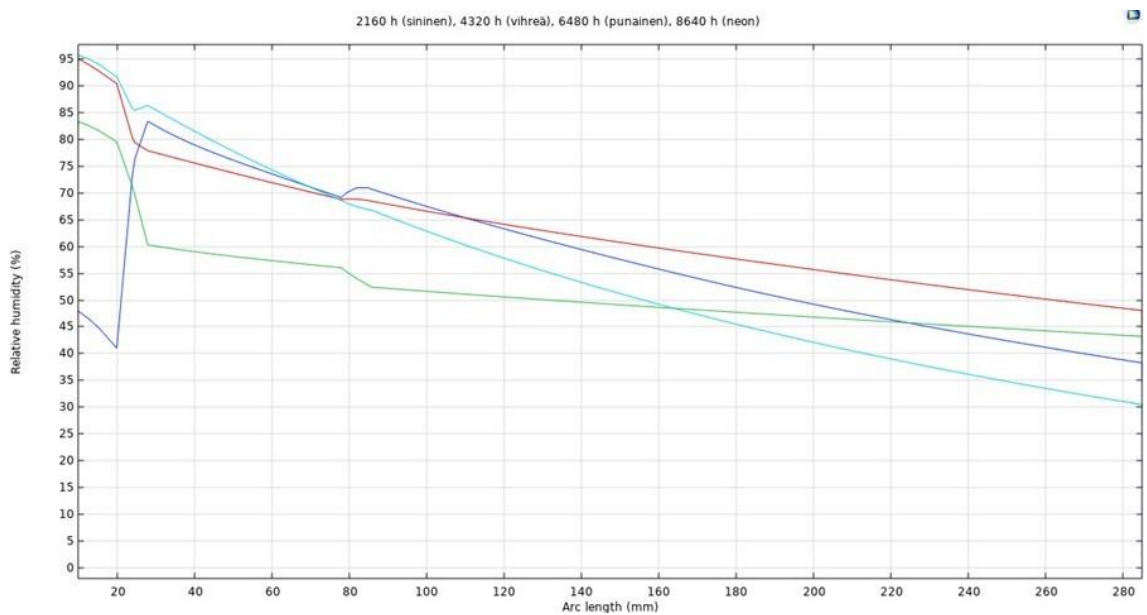
Vauriottomassa tapauksessa tutkimuspisteiden suhteellinen kosteus ja lämpötila esitettiin vuoden ajalta Kuvissa 40, 41, 42 ja 43. Vasemmanpuoleinen y-akseli kertoi lämpötilan [$^{\circ}\text{C}$] ja oikeanpuoleinen y-akseli suhteellisen kosteuden [%] arvon. X-akseli kertoi ajan [d] lähtien Vantaan rakennusfysikaalisen testivuoden 2030 tammikuun 1. päivästä. Kuvaajissa **lämpötila on esitetty aina punaisella värillä ja suhteellinen kosteus sinisellä.**



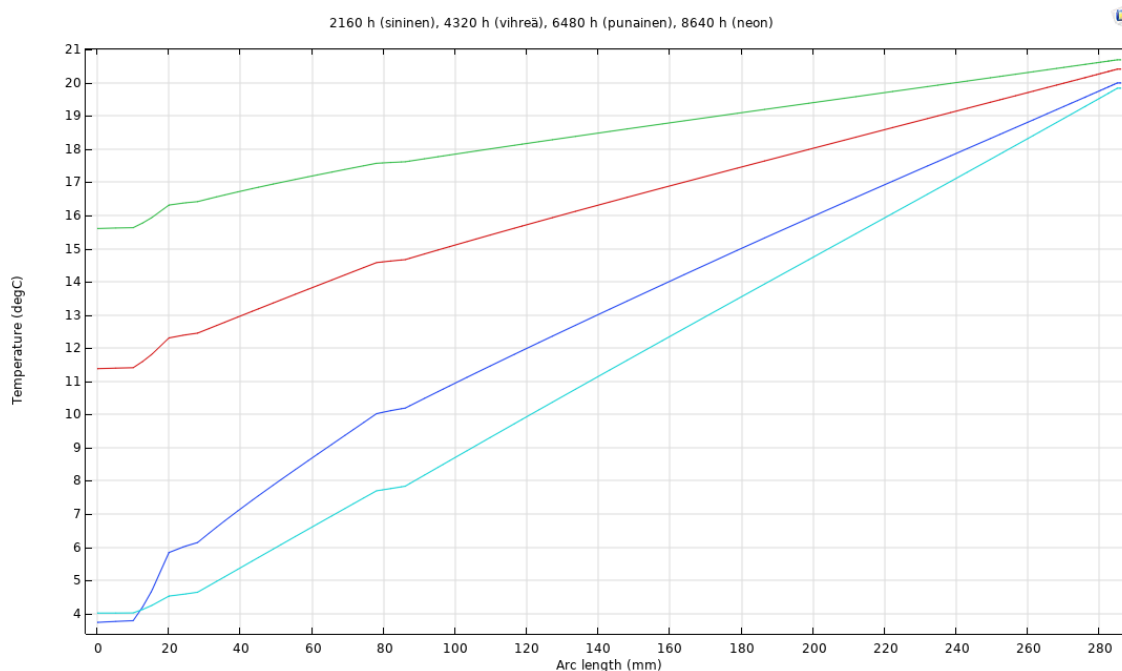
Kuva 40. Järjestelmäjulkisivun Piste 1 suhteellinen kosteus ja lämpötila vuoden ajalta vauriottomassa tapauksessa.



Kuva 41. Järjestelmäjulkisivun Piste 2 suhteellinen kosteus ja lämpötila vuoden ajalta vauriottomassa tapauksessa.

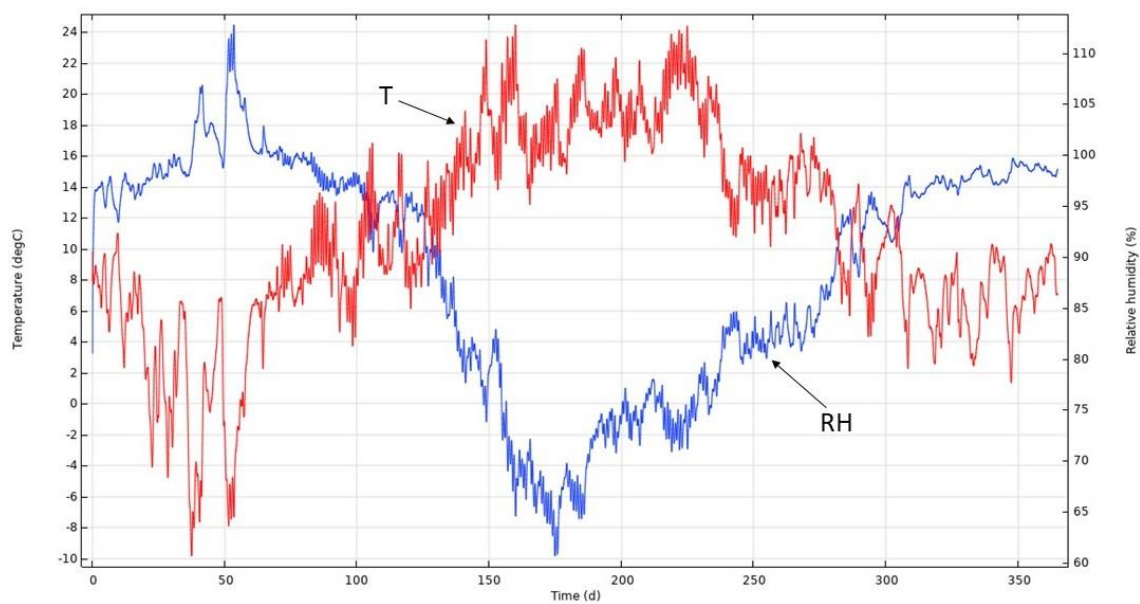


Kuva 42. Järjestelmäjulkisivun suhteellisen kosteuden jakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 1 pitkin vauriottomassa tapauksessa.

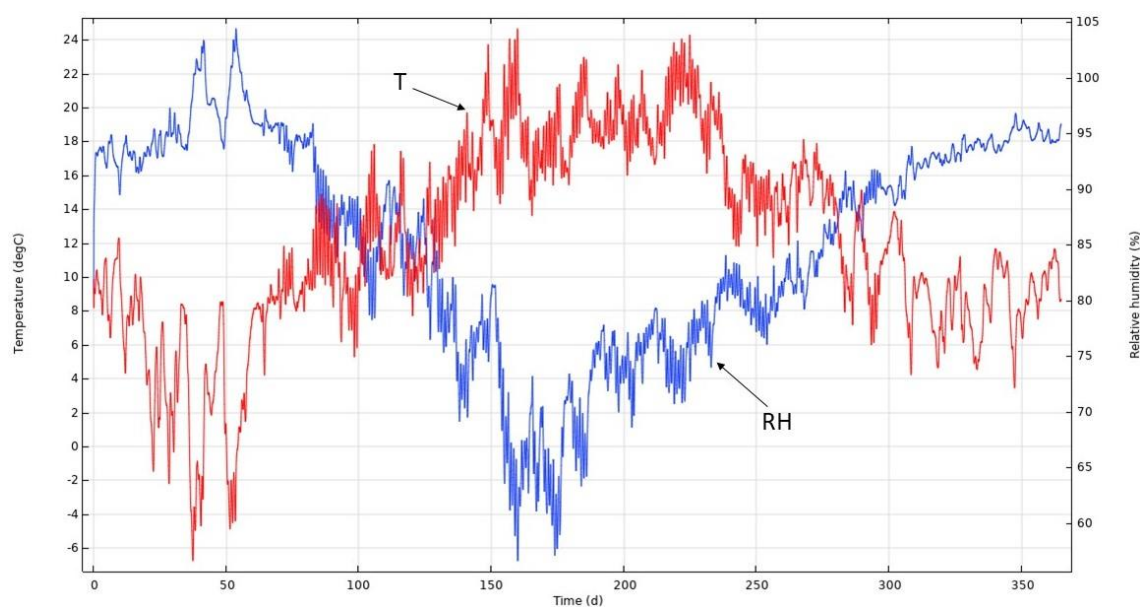


Kuva 43. Järjestelmäjulkisivun lämpötilajakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 1 pitkin vauriottomassa tapauksessa.

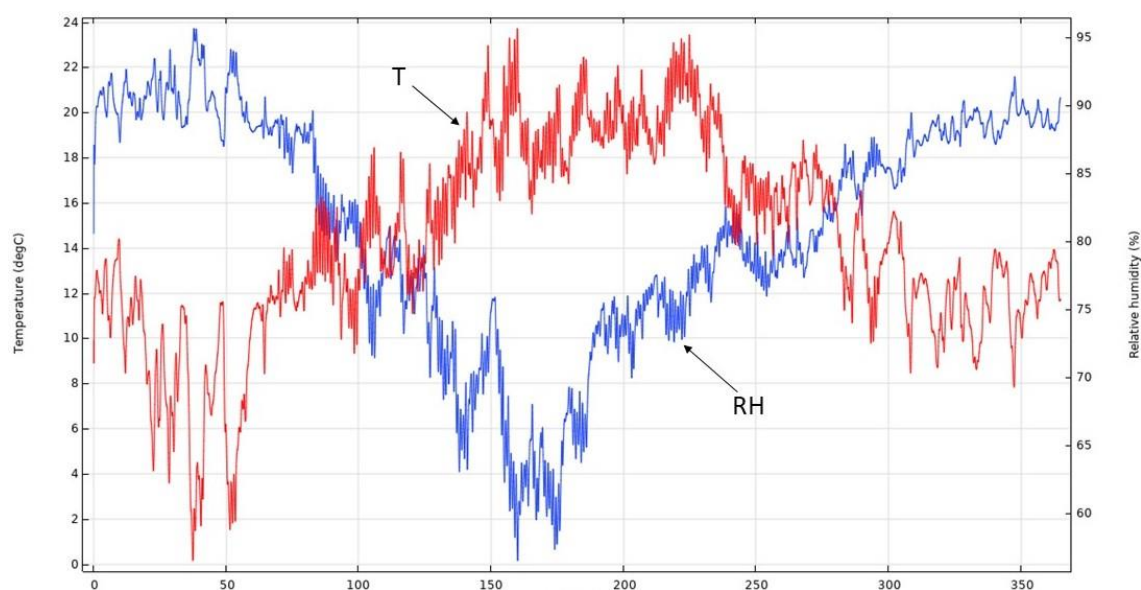
Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun vauriotapauksen tutkimuspisteiden tulokset esitettiin Kuvissa 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 ja 51. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun vauriotapauksessa sisäilman kosteus pääsi rakenteen sisään peltiprofiilin ja pystyalumiiniprofiilin välisestä 2 mm raosta. Lisäksi EPDM-kumien ja alumiiniprofiilien väleihin toiselle puolelle mallinnettiin 2 mm raot, joista tuuletusraossa virtaava ulkoilma pääsi kosketuksiin paksun mineraalivillakerroksen kanssa. Ilmaraossa virtaavalle ilmalle asetettiin ulkoilman olosuhteet ja ilma asetettiin liikkumaan 0,1 m/s nopeudelle kohti paksua mineraalivillakerrosta.



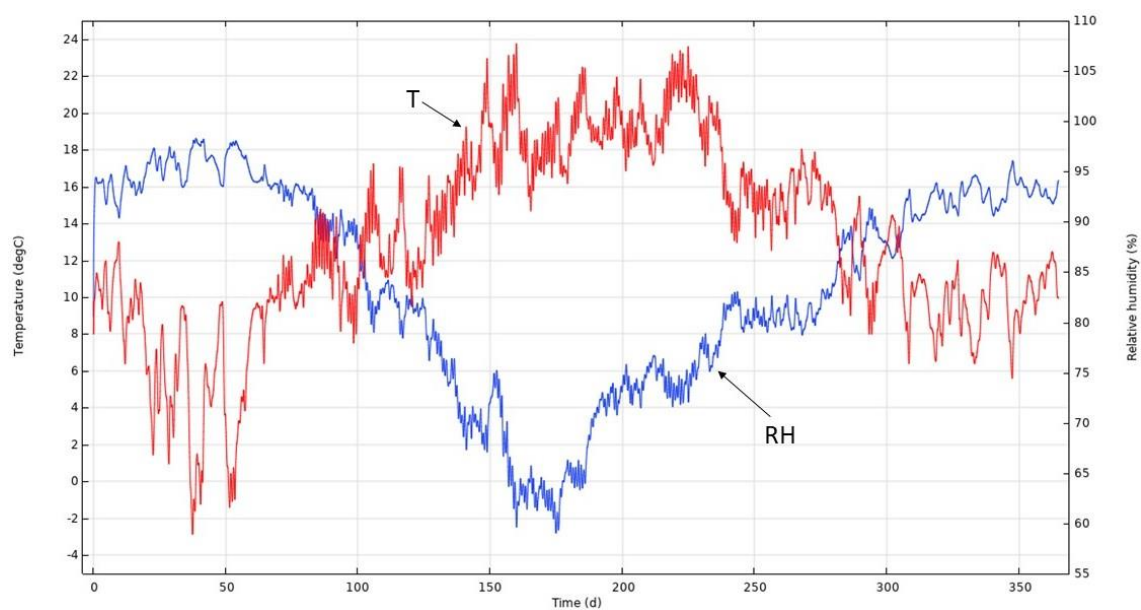
Kuva 44. Järjestelmäjulkisivun vauriotapauksen Piste 1 suhteellinen kosteus ja lämpötila.



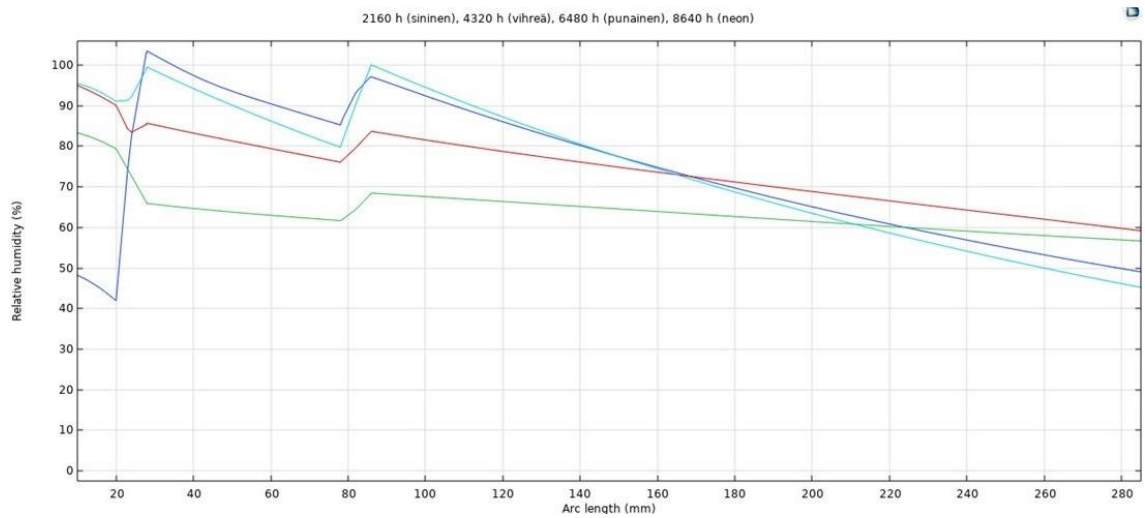
Kuva 45. Järjestelmäjulkisivun vauriotapauksen Piste 2 suhteellinen kosteus ja lämpötila.



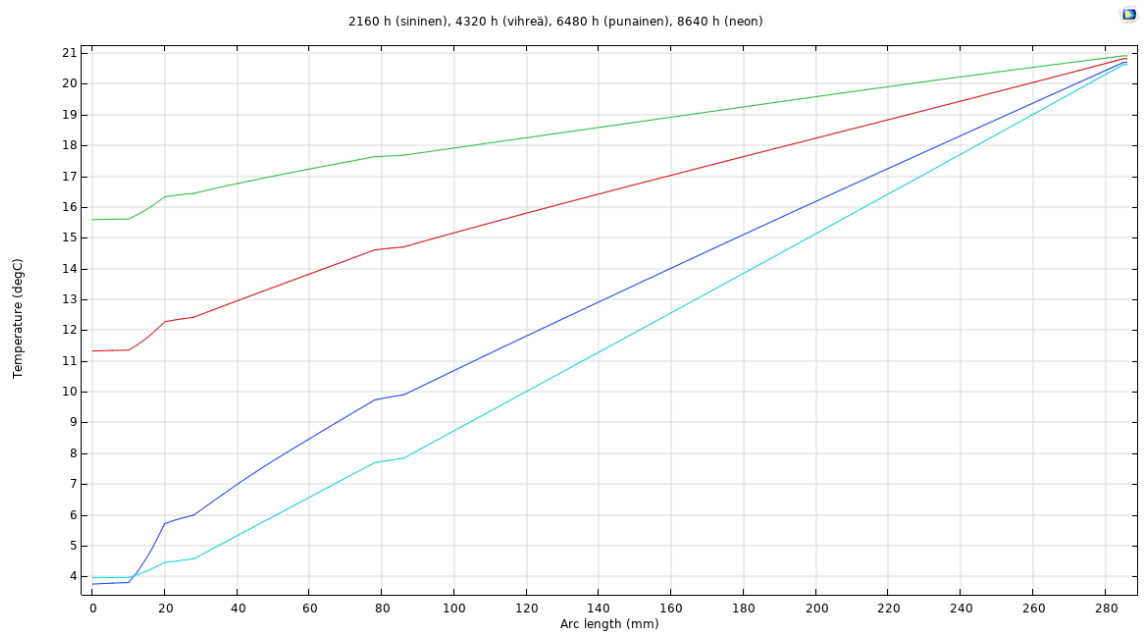
Kuva 46. Järjestelmäjulkisivun vauriotapauksen Piste 3 suhteellinen kosteus ja lämpötila.



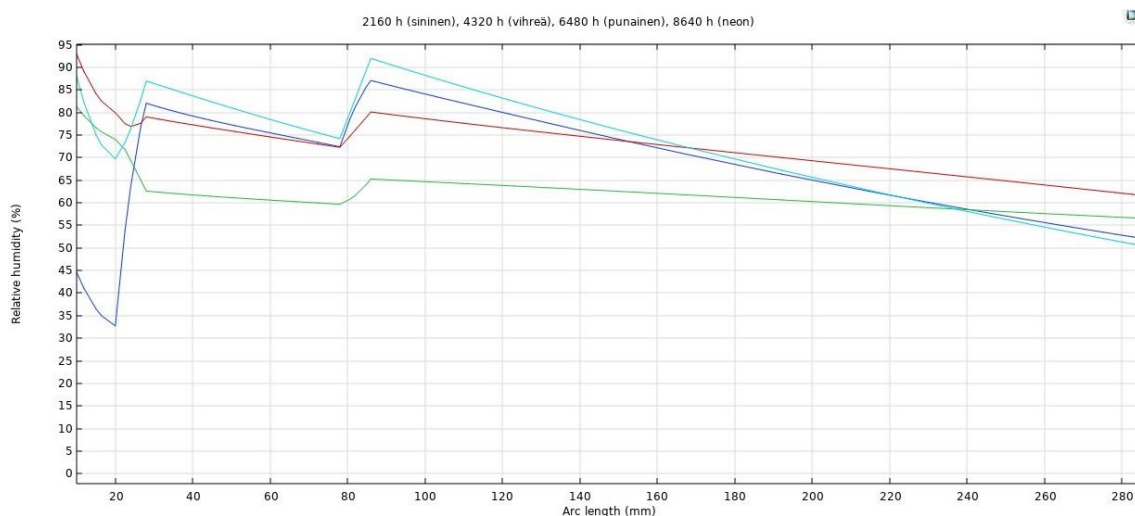
Kuva 47. Järjestelmäjulkisivun vauriotapauksen Piste 4 suhteellinen kosteus ja lämpötila.



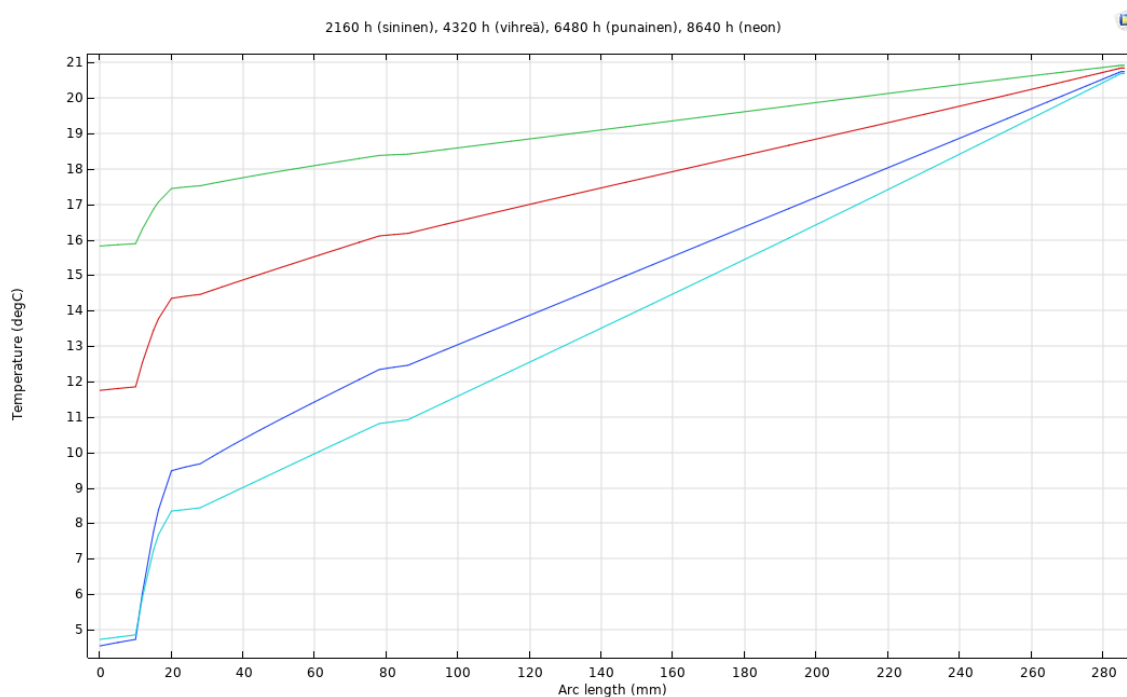
Kuva 48. Järjestelmäjulkisivun suhteellisen kosteuden jakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 1 pitkin vauriotapauksessa.



Kuva 49. Järjestelmäjulkisivun lämpötilajakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 1 pitkin vauriotapauksessa.

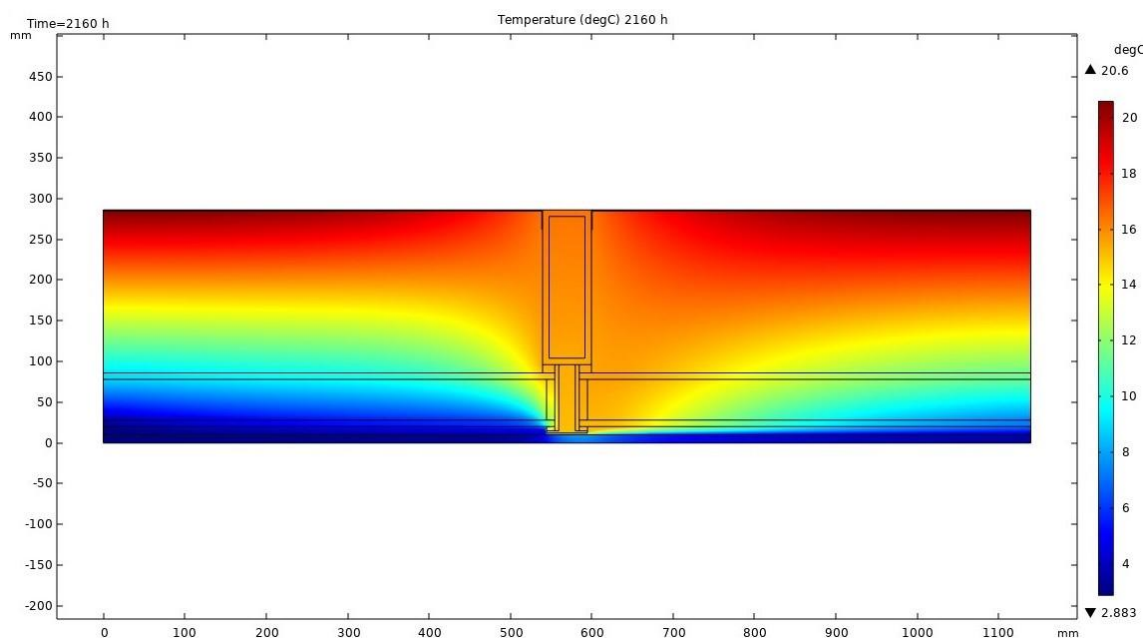


Kuva 50. Järjestelmäjulkisivun suhteellisen kosteuden jakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 2 pitkin vauriotapauksessa.

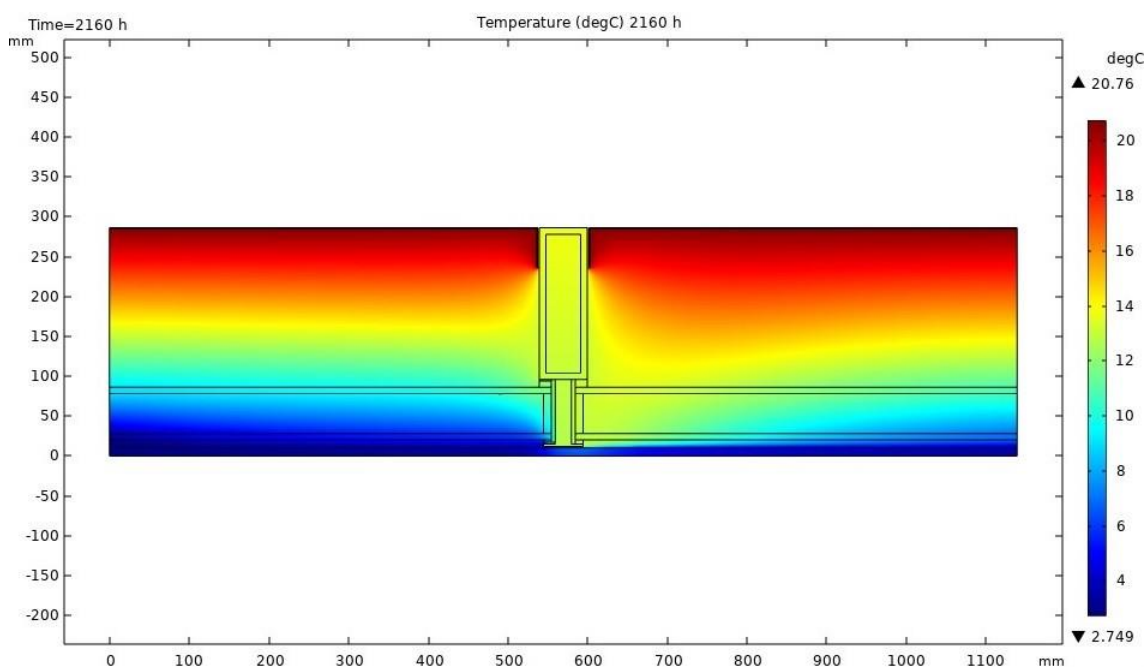


Kuva 51. Järjestelmäjulkisivun lämpötilajakauma kolmen kuukauden välein Viivaa 2 pitkin vauriotapauksessa.

Kuvassa 52 esitetään kevyen järjestelmäjulkisivun vauriottoman tapauksen lämpötilajakauma maaliskuun lopussa. Kuvassa 53 esitetään kevyen järjestelmäjulkisivun vauriotapauksen lämpötilajakauma maaliskuun lopussa.



Kuva 52. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun lämpötilajakauma vauriottomassa tapauksessa maaliskuun lopussa.



Kuva 53. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun lämpötilajakauma vauriotapauksessa maaliskuun lopussa.

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Betonisandwich-elementti

Betonisandwich-elementin mineraalivillakerroksen ulkopinnassa sijaitsevan tarkastelupisteen 1 suhteellinen kosteus ja lämpötila pysyivät vuoden mittaisen simulaation aikana lähestulkoon samoina Kuvan 27 vauriottoman ja Kuvan 32 vauriotapauksen perusteella. Pystysaumassa olevalla 2 mm levyisellä raolla ei ollut vaikutusta pisteen 1 suhteellisen kosteuden tai lämpötilan arvoihin. Tämä oli odotettu tulos, koska ilma virtaa vaakaurassa pakotetusti vasemmalta oikealle. Vauriotapauksella ei havaittu olevan vaikutusta pisteen 1 suhteelliseen kosteuteen tai lämpötilaan vuoden mittaisen simulaation missään vaiheessa.

Betonisandwich-elementin mineraalivillakerroksen ulkopinnassa sijaitsevan tarkastelupisteen 2 suhteellinen kosteus ja lämpötila pysyivät vuoden mittaisen simulaation aikana lähestulkoon samoina Kuvan 28 vauriottoman ja Kuvan 33 vauriotapauksen perusteella. Pystysaumassa olevalla 2 mm levyisellä raolla ei ollut vaikutusta pisteen 2 suhteellisen kosteuden tai lämpötilan arvoihin. Vauriotapauksella ei havaittu olevan vaikutusta pisteen 2 suhteelliseen kosteuteen tai lämpötilaan vuoden mittaisen simulaation missään vaiheessa.

Betonisandwich-elementin mineraalivillakerroksen ja betonisisäkuoren rajapinnassa sijaitsevan tarkastelupisteen 3 suhteellinen kosteus ja lämpötila pysyivät vuoden mittaisen simulaation aikana lähestulkoon samoina Kuvan 29 vauriottoman ja Kuvan 34 vauriotapauksen perusteella. Pystysaumassa olevalla 2 mm levyisellä raolla ei ollut vaikutusta pisteen 3 suhteellisen kosteuden tai lämpötilan arvoihin. Vauriotapauksella ei havaittu olevan vaikutusta pisteen 3 suhteelliseen kosteuteen tai lämpötilaan vuoden mittaisen simulaation missään vaiheessa.

Tarkasteluviivan 1 suhteellisen kosteuden jakaumat vauriottoman Kuva 30 ja vauriotapauksen Kuva 35 välillä eroavat ainoastaan betoniulkokuoren osalta, jossa vauriotapauksessa on havaittavissa hiukan korkeampia suhteellisen kosteuden arvoja. Tarkasteluviiva 1 sijaitsi vaurion läheisyydessä, jolloin voitiin päätellä, että ulkoilman

kosteus kasvatti hiukan betonin suhteellista kosteutta vaurion läheisyydessä. Simuloitavaan geometriaan valittiin vaakaleikkaus, jossa näkyi vaakauritus. Pystysaumassa oleva 2 mm rako tuulettui geometriassa vaakauraan ja tämän takia vauriotapauksen mineraalivillan suhteellinen kosteuspitoisuus ei noussut. Vaikka vaakaleikkaus olisi otettu kohdasta, jossa vaakauritusta ei olisi näkynyt, niin ristiinuritetussa kuitumaisessa mineraalivillaeristeessä kosteus pystyisi siirtymään diffuusiolla urituksen kohdalle, josta kosteus siirtyisi ilmavirtauksen mukana konvektiolla ulos rakenteesta. Reaalimaailmassa mineraalivillakerroksessa esiintyisi myös sisäistä konvektiota, jolla olisi rakennetta kuivattava ja U-arvoa kasvattava vaikutus. Tässä työssä rakenteen sisäistä konvektiota ei otettu huomioon, jolloin saatiin kosteusteknisen toimivuuden osalta varmallalla puolella olevia tuloksia.

Tarkasteluvuoden 1 lämpötilajakaumat vauriottoman Kuva 31 ja vauriotapauksen Kuva 36 välillä erosivat ainoastaan betoniulkokuoren osalta, jossa vauriotapauksessa oli havaittavissa hiukan matalampia lämpötiloja ulokuoren matkalla talvikuukausina (sinisen ja neon väriset kuvaajat). Tämä johtui vauriotapauksen 2 mm ilmaraossa virtaavasta viileän ulkoilman lämpötilaa laskevasta vaikutuksesta ja betonin hyvästä lämmönjohtavuudesta. Eroa ei kuitenkaan pidetty merkittävä rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta.

Kuvassa 37 esitettiin betonisandwich-elementin lämpötilajakauma vauriottomassa tapauksessa maaliskuun lopussa. Kuvassa 38 esitettiin betonisandwich-elementin lämpötilajakauma vauriotapauksessa maaliskuun lopussa. Lämpötilajakaumat erosivat ainoastaan pystysauman kohdalla toisistaan, missä vauriotapauksessa lämpötila oli hiukan alhaisempi kuin vauriottomassa tapauksessa.

Tuloksista nähtiin, että mineraalivillakerroksen ulkopinnassa sijaitsevista pisteistä 1 ja 2 suhteellinen kosteus pysyi vuoden mittaisen simulaation aikana samalla tasolla eli rakenne ei kuivunut vuoden aikana. Tämä johtui osaltaan siitä, että tuuletusurassa virtaavalla ilmalla oli ulkoilman ominaisuudet, jolloin suhteellinen kosteus seurasi likimain ulkoilman suhteellista kosteuspitoisuutta.

Parannetun homemallin avulla arvioitiin homeen kasvua mineraalivillakerroksen ulko- ja sisäpinnilla. Mineraalivilla kuului materiaalina homehtumisherkkyyssluokkaan HH3. Mineraalivillan homeen kasvuun kannalta suotuisat olosuhteet saavutettiin, kun suhteellinen kosteus oli yli 85 % ja lämpötila yli 0 °C. Kuvista 27 ja 32 nähtiin, että pisteen 1 suhteellinen kosteus sahaa 85 % paikkeilla edes takaisin. Homehtumisherkkyyssluokkaan HH3 kuuluvan materiaalin homeindeksin kehittyminen arvoon 1,0 vie lämpötilassa 20 °C ja suhteellisessa kosteudessa 90 % parannetun homemallin mukaan noin 65 viikkoa (RIL 255-1 2014, s. 63). Homeindeksin maksimiarvoksi Suomen ilmastossa on valittu arvo 1,0, jolloin homeen kasvua ei sallita. Kuvista 27 ja 32 nähtiin, että mineraalivillakerroksen ulkopinnassa pisteen 1 kohdalla ei ollut homehtumisvaaraa parannetun homemallin perusteella, koska pisteen 1 suhteellinen kosteus ylittää vain hetkellisesti suhteellisen kosteuden arvon 85 %. Parannetun homemallin mukaan homeindeksin arvon 1,0 saavuttaminen vaatisi yli vuoden verran suhteellisen kosteuden pysymisen yli 90 %.

Kuvista 28 ja 33 nähtiin, että pisteen 2 suhteellinen kosteus sahaa 85 % paikkeilla edes takaisin. Kuitenkin suhteellinen kosteus ei ollut riittävän pitkään yli 85 % saavuttamaan homeindeksin maksimiarvoa 1,0. Parannetun homemallin mukaan homehtumisvaaraa ei havaittu mineraalivillakerroksen ulkopinnassa pisteessä 2.

Betonisisäkuoren ja mineraalivillakerroksen rajapinnassa sijaitsevasta pisteen 3 tuloksista nähtiin, että rakenne kuivui jo 1. vuoden aikana rakenteen lämpimältä puolelta. Rakenteen lämpimällä puolella pisteessä 3 mineraalivillan rajapinnan suhteellinen kosteus ei myöskään käy kertaakaan homeen kasvulle suotuisissa olosuhteissa Kuvan 29 ja Kuvan 34 perusteella.

Betonisandwich-elementin pystysauman vaurioituminen ei vaikuttanut lähes ollenkaan rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Homeen kasvun kannalta suotuisia suhteellisen kosteuden olosuhteita esiintyi mineraalivillakerroksen ulkopinnassa vain lyhytaikaisesti, jolloin rakennetta voidaan pitää parannetun homemallin perusteella kosteusteknisesti toimivana ja varmana. Rakennetta voidaan pitää tämän tutkimuksen perusteella kosteusteknisesti turvallisena ja toimivana vaihtoehtona korkeaan rakentamiseen, jossa

julkisivuun kohdistuu voimakasta viistosaderasitusta, johtuen korkeammista tuulen nopeuden arvoista.

Betonisandwich-elementti, jossa on uritettu lämmöneriste on todettu aikaisemmissa tutkimuksissa (Nieminen & Salonvaara 2003), (Ojanen 2009) ja (Savolainen 2018) lämpö- ja kosteusteknisesti toimivaksi rakenteeksi ja tämä tutkimus tukee kyseisiä johtopäätöksiä. Savolainen vuonna 2018 julkaistussa diplomityössään (Savolainen 2018) tutki betonisandwich-ulkoseinän kosteusteknistä toimivuutta. Rakennepaksuudet olivat Savolaisen työssä hiukan kapeampia, mutta tulokset ovat muuten vertailukelpoisia tämän tutkimuksen tuloksiin. Savolainen suoritti simulaation viiden vuoden ajalta, joten tämän työn tuloksia verrataan Savolaisen ensimmäisen vuoden simulaatiotuloksiin. Lämpötilajakaumat eivät poikkea tutkimusten välillä. Savolaisen suhteellisen kosteuden arvot mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnassa tuuletusuran vieressä olivat noin 10 % korkeampia kuin tässä työssä saadut arvot. Tämä johtunee osittain ainakin Savolaisen käyttämistä ohuemmista rakennepaksuuksista sekä hiukan poikkeavista materiaaliominaisuuksista. Muun muassa Savolaisen betonin diffuusiovastuskerroin on huomattavasti korkeampi kuin tässä työssä käytetty betonin diffuusiovastuskerroin. Lisäksi Savolaisen suhteellisen kosteuden arvot mineraalivillan ja betonisisäkuoren rajapinnassa ovat myös noin 10 % korkeampia kuin tässä työssä saadut arvot. Savolainen suoritti simulaatiot 3D-mallien avulla, joista erot tutkimuksien väleillä ainakin osittain voisivat johtua. 3D-malleissa rakenteiden lämmön ja kosteuden varastoituminen otetaan paremmin huomioon johtuen rakenteen tilavuuden kuvaamisesta realistisemmalla tavalla.

Savolaisen (Savolainen 2018) ja VTT:n (Nieminen & Salonvaara 2003) tutkimuksista käy ilmi, että tuuletusurilla varustettujen betonisandwich-elementtien suhteellisen kosteuden arvot ovat alhaisempia kuin tuulettamattomien rakenteiden arvot betoniulkokuoren ja mineraalivillakerroksen rajapinnalla. Tutkimuksissa siis todetaan tuuletuksen edistävän mineraalivilla eristekerroksen sekä betonikuorien kuivumista.

Tämän tutkimuksen betonisandwich-elementin tuloksien merkitys korostuu etenkin julkisivurakenteen valintaa tehdessä, jolloin tämä tutkimus toimii hyvänä päätöksenteon tukena. Lisäksi tutkimus antaa suunnittelijoille ajantasaista tietoa betonisandwich-

rakenteen mahdollisista riskipaikoista sekä mihin kohtiin erityisesti kannattaa kiinnittää huomiota rakennedetaljeja laadittaessa.

6.2 Kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu

Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun paksun mineraalivillakerroksen ja kuitusementtilevyn rajapinnassa sijaitsevien pisteiden 1 ja 2 vauriottoman tapauksen suhteellinen kosteus ja lämpötila esitettiin Kuvissa 40 ja 41. Vauriottomassa tapauksessa tarkastelupisteiden 1 ja 2 kohdilla rakenne kuivui vuoden mittaisen simulaation aikana huomattavasti. Pisteessä 1 suhteellinen kosteus oli tammikuun alussa 95 %:ssa, kun saman vuoden joulukuussa suhteellinen kosteus oli enää alle 70 %. Pisteessä 2 suhteellinen kosteus laski tammikuun 80 %:sta joulukuuhun mennessä 55 %. Vaurioton rakenne toimi kosteusteknisesti hyvin eikä homeen kasvuille otollisia olosuhteita esiintynyt.

Vauriottomassa tapauksessa pisteen 2 lämpötila on korkeampi kuin pisteen 1 lämpötila. Tämä johtui alumiinipystyprofiilin hyvästä lämmönjohtavuudesta. Tästä johtuen pisteen 2 suhteellinen kosteus oli alhaisempi kuin pisteen 1 suhteellinen kosteus, koska suhteellinen kosteus tunnetusti riippuu lämpötilasta. Kuvassa 52 esitettiin kevyen järjestelmäjulkisivun vauriottoman tapauksen lämpötilajakauma maaliskuun lopussa.

Vasemmanpuoleisessa vauriotapauksessa sisäilman kosteus pääsi paksuun mineraalivillakerrokseen 2 mm levyisen raon kautta pellin ja alumiinipystyprofiilin välistä. Lisäksi ulkoilman kosteus pääsi EPDM-kumien ja alumiinisen kiinnikkeen välisestä 2 mm raosta paksuun mineraalivillakerrokseen. Tämän vauriotapauksen pisteiden 1 ja 2 tulokset esitettiin Kuvissa 44 ja 45. Kuvista 44 ja 45 nähtiin, että rakenteen suhteellinen kosteus ei laskenut vuoden mittaisen simulaation aikana vaan rakenteeseen kertyi hieman lisää kosteutta. Joulukuun lopussa suhteellinen kosteus oli korkeammalle kuin tammikuun alussa eli kosteutta kertyi simulaation aikana rakenteeseen pisteiden 1 ja 2 kohdalla. Parannetun homemallin perusteella HH3 luokkaan kuuluvan mineraalivillan homeindeksi ei kuitenkaan vuoden mittaisen simulaation aikana saavuta arvoa 1,0 tarkastelupisteissä 1 ja 2. Yli 85 % suhteellisen kosteuden arvot saavutettiin, kun lämpötila oli suurimmaksi osaksi alle 10 °C. Homeen kasvu hidastuu merkittävästi lämpötilan laskiessa ja pysähtyy lämpötilan laskiessa alle 0 °C. Pitemmällä

simulaatioajalla nähtäisiin kertyisikö kosteutta rakenteeseen haitallisia määriä, joka nostaisi suhteellisen kosteuden arvoja riittävästi, jolloin homeen kasvunopeus nopeutuisi.

Kuvasta 45 nähdään, että vauriotapauksen pisteen 2 suhteellinen kosteus on koko simulaation ajan alhaisempana kuin pisteen 1. Tämä johtui pisteen 2 korkeammasta lämpötilasta, jolloin suhteellinen kosteus on alhaisempi. Lisäksi pisteen 2 lämpötila varsinkin talvikuukausina on korkeampi kuin pisteen 1 lämpötila. Tämä aiheutui alumiiniprofiileiden hyvästä lämmönjohtavuudesta, jonka takia lämpö pystyi siirtymään nopeasti sisäpuolelta ulkoilmaa kohti. Kuvassa 53 havainnollistettiin rakenteeseen alumiiniprofiilin takia muodostunutta lämpimämpää aluetta. Lämpö siirtyy johtumalla aina lämpimämmästä kylmempään eli lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan. Kuvasta 53 nähtiin myös, että alumiiniprofiilin oikeapuoleinen rakenne on lämpimämpi kuin vasemmanpuoleinen. Tämä johtui vasemmalla puolella sijaitsevasta vauriosta, josta ulkoilma pääsi rakenteen sisään, mutta osittain myös alumiiniprofiilin lämmittävästä vaikutuksesta tuuletusväliässä virtaavaa ilmaa kohtaan.

Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun vauriottoman ja vauriotapauksen lämpötilajakaumia vertailtaessa Kuvissa 52 ja 53 huomattiin myös, että rakenteeseen muodostui alumiinipystyprofiilin kohdalle kylmäsilta vauriotapauksessa. Tämä johtui ulkopuolisesta vauriosta, jossa viileä ulkoilma pääsi rakenteen sisään ja laski viereisten materiaalien lämpötilaa. Kyseinen kohta on riskialtis kosteuden kondensoitumiselle ja mahdolliselle kosteuden kerääntymiselle.

Oikeanpuoleisessa vauriotapauksessa vain sisäilman kosteus pääsi rakenteen sisään 2 mm levyisestä raosta. Piste 4 oli symmetrinen pisteen 1 kanssa ja piste 3 oli symmetrinen pisteen 2 kanssa. Oikeanpuoleisen vauriotapauksen pisteiden 3 ja 4 simulaatiotulokset esitettiin Kuvissa 45 ja 47. Kuvien 46 ja 47 perusteella nähtiin, että pelkkä vaurio pelti- ja alumiiniprofiilin välillä aiheutti jo rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen ongelmia. Kuvista 46 ja 47 suhteellisen kosteuden käyristä nähtiin, että suhteellinen kosteus palasi loppuvuodesta samalla tasolle kuin simulaation alussa. Rakenne ei siis kuivunut ensimmäisen simulaatiovuoden aikana. Parannetun homemallin perusteella HH3 luokkaan kuuluvan mineraalivillan homeindeksi ei kuitenkaan vuoden mittaisen simulaation aikana saavuta arvoa 1,0 tarkastelupisteissä 3 ja 4. Yli 85 % suhteellisen

kosteuden arvot saavutettiin, kun lämpötila oli suurimmaksi osaksi alle 10 °C, joten homeindeksin kehittyminen on hidasta.

Kuvien 46, 47 ja 53 perusteella nähtiin, että pisteen 3 lämpötila oli korkeampi kuin pisteen 4 lämpötila. Tämä johtui pystyalumiiniprofiilin hyvin lämpöä johtavasta vaikutuksesta. Lisäksi alumiiniprofiilin sisimmäisen pinnan lämpötila asetettiin simulaatiossa vakioarvoon 21 °C, jolloin lämpö siirtyi alumiiniprofiilia pitkin kohti kylmempiä alueita jatkuvasti. Vauriottoman tapauksen Kuvan 40 ja vasemmanpuoleisen vauriotapauksen Kuvan 44 lämpötilakuvaajat eivät eronneet toisistaan pisteessä 1 tarkasteltuna. Suhteellinen kosteus vauriotapauksessa oli huomattavasti korkeammalla koko vuoden mittaisen simulaation ajan.

Kuvan 44 vasemmanpuoleisen vauriotapauksen pisteen 1 tuloksia verrattaessa Kuvan 47 oikeanpuoleisen vauriotapauksen pisteen 4 tuloksiin huomattiin, että vasemmanpuoleisessa vauriossa suhteellinen kosteus on koko simulaation ajan korkeammalla tasolla kuin oikeanpuoleisessa vauriossa, jossa vain sisäilman kosteus pääsi rakenteen sisään. Tämä johtui suurimmaksi osaksi siitä, että tuuletusurassa virtaava ulkoilma pääsi vaurion kautta paksuun mineraalivillakerrokseen ja nostatti suhteellista kosteuspitoisuutta. Oikeanpuoleisessa vauriotapauksessa pisteessä 4 lämpötila oli varsinkin kylminä kuukausina korkeampi kuin vasemmanpuoleisessa vauriotapauksessa pisteessä 1. Tämä johtui pääosin siitä, että kylmä ilma pääsi virtaamaan syvemmälle rakenteeseen vasemmanpuoleisessa tapauksessa vaurion kautta.

Pisteessä 2 vauriottoman tapauksen Kuva 41 lämpötila oli varsinkin talvikuukausina korkeampi kuin vasemmanpuoleisen vauriotapauksen Kuvan 45. Suhteellinen kosteus vauriotapauksessa oli huomattavasti korkeammalla koko vuoden mittaisen simulaation ajan.

Kuvan 45 vasemmanpuoleisen vauriotapauksen pisteen 2 tuloksia verrattaessa Kuvan 46 oikeanpuoleisen vauriotapauksen pisteen 3 tuloksiin huomattiin, että vasemmanpuoleisessa vauriossa suhteellinen kosteus on koko simulaation ajan korkeammalla tasolla kuin oikeanpuoleisessa vauriossa, jossa vain sisäilman kosteus pääsi rakenteen sisään. Tämä johtui suurimmaksi osaksi siitä, että tuuletusurassa virtaava

ulkoilma pääsi vasemmanpuoleisessa tapauksessa vaurion kautta paksuun mineraalivillakerrokseen ja nostatti suhteellista kosteuspitoisuutta. Oikeanpuoleisessa vauriotapauksessa pisteessä 3 lämpötila oli varsinkin kylminä kuukausina korkeampi kuin vasemmanpuoleisessa vauriotapauksessa pisteessä 2. Tämä johtui pääosin siitä, että kylmä ilma pääsi virtaamaan syvemmälle rakenteeseen vasemmanpuoleisessa tapauksessa vaurion kautta.

Jokaisessa tutkitussa kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun vauriotapauksessa tutkimuspisteiden suhteellinen kosteus ei laskenut vuoden mittaisen simulaation aikana. Rakenteesta ei siis poistunut kosteutta. Vauriottomassa tapauksessa taas tutkimuspisteiden suhteellinen kosteus laski selvästi simulaation aikana. Tästä voitiin päätellä, että kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu on herkkä jo kyseisille pienille vaurioille. Toisaalta parannetun homemallin mukaan homeindeksi paksun mineraalivillakerroksen ulkoreunalla ei saavuttanut homeindeksille asetettua maksimiarvoa 1,0 vuoden mittaisen simuloinnin aikana.

Järjestelmäjulkisivun tarkasteluviivan 1 lämpötilajakaumat vauriottoman Kuvan 43 ja vauriotapauksen Kuvan 49 välillä eivät eronneet toisistaan merkittävästi. Vauriotapauksen tarkasteluviivan 2 Kuvan 51 lämpötilajakauma erosi vauriottoman Kuvan 43 ja vauriotapauksen Kuvan 49 tarkasteluviivasta 1. Kuvan 51 tarkasteluviivan lämpötila nousi kaikkina neljänä tulostettuna tarkastelu ajanhetkenä ilmavälin kohdalla. Tämä johtui alumiiniprofiilin lämpöä johtavasta vaikutuksesta. Lämpö siirtyi lämpimämmästä kappaleesta kylmempään ja lämpötilaero pyrki tasoittumaan. Eli alumiiniprofiilista lämpö siirtyi ilmavälissä vasemmalta oikealle liikkuvaan ilmaan. Lämmennyt tuuletusvälin ilma nostatti Kuvan 51 mukaisesti lämpötiloja varsinkin talvikuukausina (sinisen ja neon väriset kuvaajat) ilmavälin kohdalla. Muilta osin lämpötilakuvaajat käyttäytyivät hyvin samankaltaisesti.

Järjestelmäjulkisivun tarkasteluviivan 1 suhteellisen kosteuden jakaumat vauriottoman Kuvan 42 ja vauriotapauksen Kuvan 48 välillä erosivat toisistaan. Vauriotapauksessa suhteellinen kosteus on varsinkin mineraalivillakerrosten ulkoreunoissa huomattavasti korkeammalla kuin vauriottomassa tapauksessa. Eli kosteutta kertyy vauriotapauksessa mineraalivillakerroksien ulkoreunojen ja kuitusementtilevyjen rajapintaan.

Vauriotapauksessa suhteellinen kosteus on koko rakenteen läpi korkeammalla jokaisella tulostetulla ajan hetkellä. Talvikuukausina suhteellinen kosteus ylitti 85 % rajan Kuvan 48 mukaan (sinisen ja neon väriset kuvaajat) noin 50 mm syvyydellä paksussa mineraalivillakerroksessa. Homehtumisvaaraa ei kuitenkaan ilmennyt tarkastelupisteiden homeindeksin tutkimisen yhteydessä. Verrattaessa Kuvan 50 vauriotapauksen tarkasteluviivaan 2, Viivan 1 suhteellinen kosteus saavutti korkeampia arvoja jokaisella tulostetulla ajan hetkellä. Tämä johtui Viivan 1 matalammasta lämpötilasta, jota analysoitiin edellisessä kappaleessa. Muutoin tulokset ovat yhteneviä keskenään.

Tutkimuksessa käytetty kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu havaittiin olevan herkkä vaurioille. Pelkkä vaurio sisäpuolella pellityksen ja alumiinipystyprofiilin välissä aiheutti rakenteeseen kosteuspitoisuuden kasvua. Kosteuden ei myöskään havaittu kuivuvan tai poistuvan rakenteesta vuoden mittaisen simulaation aikana. Rakenteen molemminpuolinen vaurio, josta myös ulkoilman kosteus pääsi rakenteen paksuun mineraalivillakerrokseen aiheutti suurempaa kosteuspitoisuuden kasvua kuin pelkkä vaurio rakenteen sisäpuolella. Vauriotapauksissa paksun mineraalivillakerroksen ulkopinnassa ja kuitusementtilevyn rajapinnassa suhteellinen kosteus ylitti talvikuukausina 100 % arvon muutaman kerran lyhytaikaisesti. Tällöin materiaalien rajapinnassa oleva kosteus tiivistyi vedeksi viileämmälle pinnalle. Erityisesti vauriotapauksissa kosteutta kertyi odotetusti mineraalivillakerroksien ulkoreunojen ja kuitusementtilevyjen rajapintaan. Parannetun homemallin perusteella homeindeksi ei kuitenkaan saavuttanut maksimiarvoa 1,0 eli toisin sanoen rakenteessa ei tapahtunut homeen kasvua.

Kyseisestä kevytrakenteisesta järjestelmäjulkisivusta ei ollut aikaisemmin tehty julkaistuja tutkimuksia. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajat ja kuvat kuitenkin vaikuttavat järkeviltä ja teorian mukaisilta eikä epä johdonmukaisuuksia löydy. Aiemmissa järjestelmäsivujen lämpö- ja kosteusteknisissä tutkimuksissa (Parviainen 2013) huomattiin, että pysty- ja vaaka alumiiniprofiilien hyvä lämmönjohtavuus aiheuttaa rakenteisiin kylmäsiltoja. Ratkaisuksi Parviainen (Parviainen 2013) ehdotti opinnäytetyössään termorankaista runkoa, jossa kylmäsilta olisi katkaistu profiilin geometrian ja rei'ityksen avulla. Myös rei'itetty alumiiniprofiili oli Parviaisen tutkimuksen perusteella parempi vaihtoehto kuin tavallinen alumiiniprofiiliputki. Tässä

työssä simuloituun rakenteeseen muodostui myös pystyalumiiniprofiilin kohdalle kylmäsilta, jota pystyttäisiin minimoimaan Parviaisen tutkimuksen perusteella rei'ittämällä profiili tietynlaiseksi tai vaihtamalla profiili termorankaiseksi. Tämä ei kuitenkaan poista vauriotapausten aiheuttamia ongelmia rakenteeseen.

Tutkimuksen tulokset ovat siinä mielessä merkittäviä, että ne paljastivat kyseisen kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun olevan herkkä jo pienille vauriolle, jolloin kyseisen rakenteen toteutukseen ja työtekniiseen onnistumiseen osataan tulevaisuudessa kiinnittää erityistä huomiota. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun tuloksien avulla pystytään muuttamaan riskikohtien detaljeja toimivimmiksi, siten että kyseiset vauriot eivät pystyisi mahdollisesti syntymään. Tutkimuksen avulla rakenteita voidaan optimoida lämpö- ja kosteusteknisesti varmemmiksi, jolloin tutkimuksen tuloksia voidaan pitää onnistuneina ja hyödyllisinä.

6.3 Rakenteiden vertailu

Tässä työssä käsiteltiin työteknisestä epäonnistumisesta johtuvia todennäköisimpiä betonisandwich-elementin ja kevyen järjestelmäjulkisivun vauriotapauksia ja niiden aiheuttamia vaikutuksia rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen verrattuna vauriottomaan tapaukseen. Vauriottomissa tapauksissa molemmat rakenteet toimivat lämpö- ja kosteusteknisesti hyvin. Vauriotapauksissa betonisandwich-elementti toimi kosteusteknisesti paremmin kuin kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu, jossa havaittiin huomattavia eroja verrattuna vauriottomaan tapaukseen.

Betonisandwich-elementin suhteellinen kosteus pysyi simulaation aikana sekä vauriottomassa että vauriotapauksessa riittävän alhaalla homeen kasvun kannalta. Suhteellinen kosteus kävi vain lyhyitä aikoja yli 85 % vuoden mittaisen simulaation aikana. 85 % suhteellinen kosteus on homehtumisherkkyysluokan HH3 materiaalin homeen kasvun kannalta kriittinen raja. Kuvista 27, 28, 32 ja 33 nähtiin, että homeindeksille asetettu maksimiarvo 1,0 ei täyttynyt eli tarkastelupisteiden suhteellinen kosteus ei ollut riittävän pitkään homeen kasvun kannalta suotuisissa olosuhteissa BSW-elementissä.

Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun vauriottomassa tapauksessa kosteuspitoisuus laski Kuvien 40 ja 41 mukaisesti eli rakenne kuivui vuoden mittaisen simulaation aikana. Vauriottomassa tapauksessa suhteellinen kosteus ei ollut riittävän korkealla missään simulaation vaiheessa riittävän pitkään homeen kasvun kannalta. Homeindeksi ei kehittynyt arvoon 1,0. Rakenne kuivui jo vuoden mittaisen simulaation aikana, joka kertoi paremmasta kosteusteknisestä toimivuudesta vauriottomassa tapauksessa kuin betonisandwich-elementti, jossa taas huomattiin rakenteen kuivuvan vain lämpimältä puolelta. Toisaalta ottaen huomioon rakenteiden kaksiulotteinen tarkastelutapa, jossa betonisandwich-elementin ristiinuritetusta mineraalivillasta esitettiin mallissa vain vaakauritus, niin rakenteen kuivuminen olisi luultavasti tehokkaampaa. Enemmän kosteutta pääsisi poistumaan rakenteesta tuuletusurien suhteellisen pinta-alan kasvaessa kolmiulotteisessa tapauksessa. Toisaalta kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun kuivuminen olisi myös tehokkaampaa kolmiulotteisessa tapauksessa tuuletusvälissä tapahtuvan pystyilmavirtauksen johdosta. Tämän dimensioreduktion seurauksena tuloksia voitiin pitää varmalla puolella olevina ratkaisuin.

Vauriotapauksissa kevytrakenteinen julkisivu toimi kosteusteknisesti heikosti. Suhteellisen kosteuden arvot jopa kasvoivat simulaation alun ja lopun arvoja vertailtaessa Kuvan 45 perusteella. Oikeanpuoleisessa vauriotapauksessa, jossa vain sisäilman kosteus pääsi rakenteeseen sisään, rakenteeseen ei kertynyt kosteutta, mutta suhteellisen kosteuden arvot palautuivat melkein simulaation alun lähtötasolle Kuvien 46 ja 47 perusteella. Oikeanpuoleinen vauriotapaus toimi kosteusteknisesti paremmin kuin vasemmanpuoleinen vauriotapaus, jossa sisäilman kosteus sekä ulkoilman kosteus pääsivät rakenteen sisään. Vasemmanpuoleisessa vauriotapauksessa kosteutta jopa kertyi vuoden aikana rakenteeseen lisää. Homeen kasvua ei kuitenkaan vielä parannetun homemallin perusteella ilmennyt kummassakaan vauriotapauksessa. Betonisandwich-elementti toimi vauriotapauksessa kosteusteknisesti paremmin kuin tutkittu järjestelmäjulkisivu, jossa oli vauriottoman ja vauriotapauksen välillä merkittävä ero kosteuspitoisuuksissa.

Tästä voitiin päätellä, että kyseinen kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu on herkkä tutkituille vauriotapauksille. Betonisandwich-elementti toimi vauriotapauksessa lähes samalla tavalla kuin vauriottomassa tapauksessa. Betonisandwich-elementin

pystysaumassa olevan raon vaikutuksen ristiinuritetun mineraalivillan vaakaura pystyi eliminoimaan tehokkaasti. Kolmiulotteisessa rakenteessa mineraalivillan ulkopinta olisi ristiinuritettu, jolloin kosteutta voisi poistua luultavasti tehokkaammin ja rakenne kuivua vuoden mittaisen simulaation aikana. Kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu osoittautui myös homehtumisherkemmäksi rakenteeksi, koska suhteellisen kosteuden arvot olivat yli 85 % pitempiä aikoja sekä lisäksi korkeampia verrattuna betonisandwich-elementtiin. Lisäksi rakenteessa olevan kosteuden kuivumista ei pystytty vuoden mittaisen simulaation pohjalta toteamaan, mikä aiheuttaa epävarmuutta rakenteen toimivuuden suhteen.

6.4 Herkkyystarkastelu

Simulaatioissa tehtiin muutamia oletuksia ja yksinkertaistuksia, joilla saattoi olla vaikutusta lopputuloksiin. Oletuksien ja yksinkertaistuksien avulla ratkaisu kuitenkin asettui varmalle puolelle. Oletuksien ja yksinkertaistuksien tavoitteena oli helpottaa mallin tekoa, lyhentää laskenta-aikoja sekä kuvata monimutkaisia ongelmia yksinkertaisemmin riittävällä tarkkuudella.

Simuloitaviksi rakenteiden ulottuvuuksiksi valittiin 2D-mallit. Perusteena valinnalle oli huomattavasti lyhemmät laskenta-ajat sekä oletettu riittävä tuloksien tarkkuus. 2D-malleissa heikkoutena oli pystyilmavirtauksen puuttuminen tuuletusvälistä tai urituksesta. Pystyilmavirtauksella olisi ollut rakenteita kuivattava vaikutus, joten sen huomiotta jättäminen aiheuttaa tulosten varmallalla puolella olemisen. 2D-mallien lämpö- ja kosteuskapasiteetit eivät vastanneet oikeiden rakenteiden ominaisuuksia, mutta ne antoivat riittävän tarkan approksimaation kyseisistä ominaisuuksista. Rakenteiden lämpö- ja kosteuskapasiteetit olisivat olleet 3D-malleissa todenmukaisempia.

Materiaaliominaisuudet valittiin RIL 255-1 2014:sta sekä COMSOLin omasta ohjelman sisäisestä materiaalikirjastosta. Materiaaliominaisuuksien valinnalla oli vaikutusta tutkimuksen tuloksiin. Materiaaliominaisuudet pyrittiin valitsemaan mahdollisimman luotettavista lähteistä niiden luotettavuuden varmistamiseksi ja simuloinnin tuloksien laadun sekä oikeellisuuden verifioimiseksi. Sandwich-elementin betoniulko ja -sisäpinnat olivat maalaamattomia ja päällystämättömiä. Kapillaarisen kosteuden siirtymisen estävä

pinnoite betonisandwich-elementin ulkopinnassa olisi luultavasti parantanut rakenteen toimivuutta entisestään.

Simuloinnin ulkolämpötila ja suhteellinen kosteus tuotiin Ilmatieteen laitoksen Vantaan 2030 rakennusfysikaalisesta testivuoden ilmastosta tunnin välein muuttuvana datana. Sisäilman suhteellisen kosteuden ja viistosateen laskentaan käytettiin hyväksi testivuoden sisältämää dataa. Simuloinnissa kyseiset parametrit muuttuivat tunnin välein, joten ilmastollisesta rasituksesta johtuva laskennanvirhe oli minimaalinen. Tässä työssä lasketut sisäilman suhteellinen kosteus ja viistosade rasitus ajan funktiona noudattivat Savolaisen (Savolainen 2018, s. 112-116) diplomityössään laskemia arvoja. Viistosateen laskennassa käytettiin tässä työssä tuulen nopeutta korkean rakentamisen olosuhteissa 120 m korkeudella, joten viistosaderasitus eteläiselle julkisivulle on vertailututkimusta suurempaa. Sisäilman suhteellisen kosteuden laskenta esitettiin Liitteessä 2 ja viistosateen laskenta Liitteessä 3.

Materiaalien sisäistä konvektiota ei otettu simulaatioissa huomioon. Tällöin saatiin varmallalla puolella olevia ratkaisuja, koska esimerkiksi mineraalivillakerroksen sisäinen konvektio kuivattaa rakennetta. Toisaalta rakenteen sisäinen konvektio heikentää rakenteen lämmöneristyskykyä, mutta tämä ei ollut tämän tutkimuksen kannalta kriittinen asia sekä lisäksi vaikutus olisi minimaalinen. Lisäksi painovoimaista kosteuden siirtymistä ei pystytty COMSOLilla ottamaan huomioon, joten se jätettiin simulaatiosta pois.

Auringon säteilyn vaikutus jätettiin simulaatioista pois sen monimutkaisuuden perusteella. Lisäksi varsinkin betonisandwich-elementtiin auringon säteilyllä olisi ollut kuivattava vaikutus, joten auringon säteilyn huomiotta jättäminen lisää simulaation varmallalla puolella olemista. Auringon säteilyn lisääminen simulaatioon olisi nopeuttanut ulkokuoren kosteuden diffuusiota rakenteen sisälle päin.

Simulaatiot suoritettiin vain eteläisille julkisivuille Vantaan 2030 ilmastollisessa kuormituksessa. Vertailutuloksien saamiseksi simulaatiot olisi voitu myös ajaa pohjoiselle julkisivulle Jokioisen 2030 ilmastossa, mutta työn rajallisuuden ja pitkien

laskenta-aikojen perusteella tähän ei ryhdytty. Vuoden 2050 ilmaston testivuoden dataa olisi myös voitu käyttää kuormittavimpien viistosade ja kosteusrasitusten luomiseksi.

Ilmavirtauksen nopeutena tuuletusväliissä ja -urissa käytettiin VTT:n (Nieminen & Salonvaara 2003, s. 53) tutkimuksessa iteroitua nopeutta $v = 0,1$ m/s. Muun muassa Savolainen (Savolainen 2018) käytti diplomityössään samaa ilmavirtauksen nopeutta betonisandwich-elementin tuuletusurassa tutkiessaan rakenteen kuivumista.

Elementtiverkon tiheyden ja tuloksien tarkkuuden herkkyyttä toisiinsa tutkittiin ennen vuoden mittaisen simulaation suorittamista. Elementtiverkon tiheyden merkitystä suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoihin tutkittiin 24 tunnin simuloinnilla muuttamalla elementtiverkon tiheyttä. Elementtiverkko vuoden mittaisessa simulaatiossa iteroitiin riittävän harvaksi, mutta kuitenkin riittävän tiheäksi antamaan tutkimuksen kannalta mahdollisimman tarkkoja tuloksia.

Elementtiverkon tiheyden havaittiin vaikuttavan merkittävästi laskenta-aikoihin. Elementtiverkon harventaminen 17 %:lla nopeutti laskentaa noin 30 % simuloinnissa käytetyllä tietokoneella. Elementtiverkko minimoitiin optimaaliseksi laskenta-ajan minimoimiseksi. Elementtiverkon harventamisella oli erittäin minimaalinen vaikutus suhteellisen kosteuden ja lämpötilan tuloksiin.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Korkean rakentamisen olosuhteissa julkisivurakenteiden on tärkeää pystyä toimimaan kosteusteknisesti oikein vaurioituneenakin. Julkisivurakenteeksi on tärkeää valita korkean rakentamisen olosuhteisiin toimintavarmaksi soveltuva ratkaisu. Julkisivurakenteiden huolto korkean rakentamisen olosuhteissa on haastavaa ja kallista, joten julkisivun lämpö- ja kosteustekninen toimivuus on tärkeää varmentaa toimivaksi simulaatioiden avulla jo suunnitteluvaiheessa.

Tutkimuksen perusteella tutkittu betonisandwich-elementti osoittautui toimintavarmemmaksi rakenteeksi lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden osalta tutkituissa vauriotapauksissa. Betonisandwich-elementin pystysauman vaurioituminen ei aiheuttanut ongelmia rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Tuuletusura poisti pystysauman vaurion kautta siirtyvää kosteutta tehokkaasti ulos rakenteesta, jolloin mineraalivillan suhteellinen kosteuspitoisuus ei noussut vauriottomaan rakenteeseen verrattuna. Tuuletusuran toimivuudella havaittiin olevan merkittävä rooli rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta. Ilman tuuletusuraa mineraalivillan ulkopinnan ja betoniulkokuoren sisäpinnan rajapintaan olisi lämpötilan laskiessa luultavasti kondensoitunut huomattavia määriä vettä. Mineraalivillan ja betonin suhteellinen kosteuspitoisuus olisi tällöin kasvanut koko simulaation ajalta. Tällöin suhteellinen kosteuspitoisuus olisi ollut pidempään korkeammalla homeenkasvulle suotuisalla alueella. Lisäksi vesi olisi voinut talvella jäätymä mineraalivillan ulkoreunan ja betoniulkokuoren väliin, heikentäen rakenteen lämmöneristeenä toimivan mineraalivillan lämmöneristyskykyä sekä altistaen betonin pakkasrapautumiselle. Betonisandwich-julkisivun kosteusteknistä toimivuutta voitaisiin parantaa maalaamalla ulkopinta kapillaarisen veden siirtymisen estävällä maalilla tai pinnoitteella, jonka avulla julkisivuun kohdistuvaa viistosaderasitusta saataisiin minimoitua.

Tutkimuksen kohteeksi valikoitunut kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu toimi kosteusteknisesti hyvin ilman vaurioita. Kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu kuivui jo ensimmäisen simuloidun vuoden aikana vauriottomassa tapauksessa eikä homeen kasvulle suotuisia olosuhteita ilmentynyt. Vasemmanpuoleisessa vauriotapauksessa, jossa sisä- ja ulkoilman kosteus pääsivät rakenteen sisään paksuun

mineraalivillakerrokseen havaittiin suurempia suhteellisen kosteuden arvoja kuin oikeanpuoleisessa vauriotapauksessa, jossa vain sisäilman kosteus pääsi rakenteen sisään. Vasemmanpuoleisen vauriotapauksen suhteellinen kosteuspitoisuus jopa nousi simulaation alun ja lopun suhteellisen kosteuden arvoja verratessa, mutta tätä ei pystytä tarkasti toteamaan yhden vuoden mittaisen simulaation pohjalta. Tämän johtopäätöksen verifioimiseksi simulaatio pitäisi ajaa muutaman vuoden ajalta, jolloin nähtäisiin jo selvästi nousisiko suhteellisen kosteuden pitoisuudet eli kertyisikö kosteutta rakenteeseen. Oikeanpuoleisessa vauriotapauksessa suhteellisen kosteuden arvot asettuivat samoihin lukemiin simulaation alun ja lopun arvoja verratessa. Oikeanpuoleisen vauriotapauksen tuloksista nähtiin, että pelkkä vaurio rakenteen sisäpuolella nostatti rakenteen suhteellisia kosteuspitoisuuksia huomattavasti korkeammalle kuin vauriottomassa tapauksessa. Kummassakaan vauriotapauksessa rakenne ei kuivunut.

Tuloksista ei pysty yhden vuoden mittaisen simulaation pohjalta tarkasti sanomaan, että kertyykö kosteutta lisää kevytrakenteiseen järjestelmäjulkisivuun vauriotapauksissa vaiko ei. Viiden vuoden simulaation ajaminen samoissa olosuhteissa ja samalla testivuodella varmistaisi asian. Kyseisen kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun kosteustekninen toimivuus osoittautui heikoksi jo tutkituilla pienillä vaurioilla. Tämän johdosta kyseinen kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu on riskialttiimpi ratkaisu toteutuksen ja asennuksen osalta korkean rakentamisen olosuhteiseen. Työtekniiseen onnistumiseen toteutuksen ja asennuksen osalta on kiinnitettävä erityistä huomiota riskien minimoimiseksi ja laadunvarmistamiseksi. Tutkittu betonisandwich-elementti osoittautui kosteustekniseltä toimivuudeltaan toimintavarmemmaksi rakenteeksi kuin kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu. Betonisandwich-elementin kosteustekninen toimivuus ei vaarannu tutkitun vaurion kautta, kun taas kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun tutkitut vauriot heikentävät merkittävästi rakenteen kosteusteknistä toimivuutta ja altistavat rakenteen vaurioitumiselle. Betonisandwich-elementti osoittautui tämän tutkimuksen perusteella toimintavarmaksi ja suositelluksi julkisivuratkaisuksi korkean rakentamisen olosuhteisiin.

Tässä työssä simuloitu kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu on vain yksi lukuisista markkinalla olevista vaihtoehtoista. Useilta valmistajilta löytyy erilaisia vaihtoehtoja,

joissa lämpö- ja kosteustekniset haasteet on ratkaistu eri tavoin. Suunnittelijan on tärkeää tunnistaa kyseisten rakenteiden riskipaikat, ja mihin kyseisissä ratkaisuissa tulee erityisesti kiinnittää huomiota rakennetyyppejä valittaessa. Tässä työssä tutkittu kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu on riskialtis jo pienillä vaurioilla, jolloin suunnitteluvaiheessa voitaisiin onnistuneesti todeta rakenne epäsoveltuvaksi korkean rakentamisen olosuhteisiin, ja valita toteutettavan kohteen rakenteeksi toimivaksi osoittautunut rakenneratkaisu.

Tässä työssä tutkitun betonisandwich-elementin rakennepaksuudet ja tuuletusurituksen dimensiot valittiin kehitystyön alla olevan kohteen perusteella. Rakennepaksuuksien tai tuuletusurituksen dimensioiden muuttaminen vaikuttaa rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen. Täten tämän tutkimuksen betonisandwich-elementin tuloksia verratessa muihin betonisandwich-elementistä tehtyihin tutkimuksiin pitää huomioida rakenteiden eriävien rakennepaksuuksien ja tuuletusratkaisujen vaikutukset tuloksiin. Eriävällä eristemateriaalilla on myös huomattava vaikutus saatuihin tuloksiin. Esimerkiksi umpisoluisella polyuretaanilämmöneristeellä toteutetun elementin sisäkuori pystyy kuivumaan vain sisälle päin, johtuen PU-eristeen umpisolurakenteen vesihöyryn diffuusion estävästä vaikutuksesta. Tutkimuksia vertailtaessa pitää olla tietoinen rakennepaksuuksien ja materiaaliominaisuuksien vaikutuksesta vertailtaviin tuloksiin.

Yhdistettyihin lämmön ja kosteuden siirtymissimulaatioiden tuloksiin vaikuttaa lukuisat valitut parametrit ja asetetut rajoitukset. Tällöin eri tutkimuksia vertailtaessa on hyvä tiedostaa kyseisistä muuttujista aiheutuma vaihtelu tuloksissa. Tässä työssä saadut tulokset betonisandwich-elementin osalta ovat yhteneviä aiempien tutkimuksien tuloksien kanssa. Kevytrakenteisesta järjestelmäjulkisivusta ei ole tehty aikaisempia tutkimuksia, mutta tulokset vaikuttivat järkeviltä ja vastasivat vastaavanlaisesta rakenteesta tehdyn tutkimuksen tuloksia.

Betonisandwich-elementin sisäpuolista pystysauman vauriota ei tässä työssä tutkittu, koska sen ei oletettu olevan kovin yleinen vauriomuoto. Jatkotutkimustarpeena olisi betonisandwich-elementin sisäpuoleisen vaurion lisääminen malliin, jolloin sisäilman kosteus pääsisi mineraalivillakerrokseen. Tällöin mineraalivillan suhteellinen kosteuspitoisuus luultavasti nousisi ainakin kesäkuukausien ajaksi. Kesäisin kosteus

luultavasti siirtyisi diffuusiolla sisäpuolelta kohti tuuletusuraa, koska kesäisin ulkoilman suhteellinen kosteus olisi alhaisempi kuin rakenteen suhteellinen kosteuspitoisuus sisäpuoleisen vaurion kanssa. Kosteus siirtyisi suuremmasta pitoisuudesta kohti alhaisempaa pitoisuutta. Tuuletusuran pinnasta rakenteen kosteus siirtyisi ilmaan, joka kuljettaisi kosteuden pois rakenteesta konvektiolla tuuletusurien toimiessa suunnitellulla tavalla.

Tutkimuksen tulokset ovat siinä mielessä merkittäviä, että ne paljastivat kyseisen kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun olevan herkkä jo pienille vauriolle, jolloin kyseisen rakenteen toteutukseen ja työtekniiseen onnistumiseen osataan tulevaisuudessa kiinnittää erityistä huomiota. Betonisandwich-elementti on todettu aikaisemmissa tutkimuksissa lämpö- ja kosteusteknisesti toimivaksi rakenteeksi ja tämä tutkimus tukee kyseisiä johtopäätöksiä. Korkean rakentamisen osuus tulee Suomen suurissa kaupungeissa tulevaisuudessa kasvamaan, joten tämän tutkimuksen tulokset antavat tärkeää tietoa julkisivurakenteen valintaa varten. Lisäksi tämä tutkimus selventää millaisia asioita julkisivurakenteen valinnassa pitää huomioida lämpö- ja kosteustekniseltä kannalta korkeaa rakentamista vastaavissa ilmasto-olosuhteissa. Tämä tieto suunnittelussa parantaa riskienhallintaa ja edistää koko alan tuottavuutta.

Tutkimuksessa saatuja tuloksia voidaan hyödyntää kehitystyön alla olevissa ja tulevaisuuden projekteissa helpottamaan ja varmentamaan päätöksentekoa. Työssä luotuja COMSOL-simulaatiomalleja pystytään jatkossa käyttämään hyödyksi tutkittaessa erilaisten rakenteiden ja niiden vauriotapauksien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. COMSOL-simulaatiomallit ovat helposti muokattavissa, jolloin mallin luotiin käytettävä aika pysyy houkuttelevana aika-tuottavuus-odotuksen pohjalta.

Tutkimus antaa suunnittelijoille tärkeää ajantasaista tietoa kyseisten rakenteiden riskipaikoista, ja mihin erityisesti on tärkeää kiinnittää huomiota julkisivurakenteen valintaa tehdessä lukuisista markkinalla olevista eri vaihtoehdoista. Tutkimus tukee suunnittelijoiden päätöksentekoa, sekä pienentää julkisivuratkaisun valintaan ja toteutuksen valvontaan kohdistuvia riskejä. Tutkimus antaa tiedeyhteisöille uutta tietoa betonisandwich-elementin ja kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta pienien vaurioiden alaisena, sekä mikä olisi

mahdollisesti riittävä vaurio rakenteen kosteusteknisen toiminnan muuttumiseen kriittisesti. Tämä mahdollistaa nykyisten rakenteiden optimoinnin ja uusien parempien rakenteiden kehittämisen. Tutkimuksen tulokset eivät ole yleistettäviä muille rakenteille kuin ainoastaan tutkimuksessa tutkituille rakenteille ja kyseisille vauriotapauksille kyseisissä ilmastollisissa olosuhteissa.

8 YHTEENVETO

Tämän diplomityön aiheena oli vertailla betonisandwich-elementtiä ja kevytrakenteista järjestelmäjulkisivua rakennusfysikaaliselta kannalta korkean rakentamisen olosuhteissa. Pääpaino rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa kohdistui työhön käytettävän ajan niukkuuden ja simuloinnissa ilmenneiden ongelmien takia erityisesti julkisivurakenteiden kosteusteknisen toimivuuden sekä rakenteiden kuivumisen varmistamiseen valitun Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden avulla. Teoriakatsauksen laajuuden ja simulaatiomalleissa ilmenneiden ongelmien takia työssä keskityttiin suurimmaksi osin vain rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen ja rakenteiden kuivumiseen. Tutkittavien rakenteiden simulointi suoritettiin kirjallisuuskatsauksen teorian pohjalta COMSOL Multiphysics -simulointiohjelmalla.

Rakennusfysikaaliset kuormitukset lisääntyvät korkean rakentamisen olosuhteissa. Julkisivuun kohdistuva tuulenpaine kasvaa korkeammalle mentäessä johtuen tuulen vertikaalisesta nopeusprofiilista. Ylimmissä kerroksissa vaikuttavat suuremmat tuulen nopeudet kasvattavat julkisivuun osuvaa viistosateen määrää. Suuremmat tuulenpaineet ja lisääntynyt viistosateen määrä aiheuttavat julkisivun saumoille ja liitoksille tiukempia vaatimuksia niiden teknisten ominaisuuksien ja toteutuksen osalta. Saumojen ja liitoksien tiiveys ja säilyvyys ovat erittäin tärkeitä kosteusteknisen toimivuuden varmistamisessa.

Kirjallisuuskatsauksessa esiteltiin kattavasti rakennusfysiikkaan liittyviä keskeisimpiä ilmiöitä ja käsitteitä, joiden pohjalta luotiin matemaattinen formulointi yhdistetylle lämmön ja kosteuden siirtymiselle. Kirjallisuuskatsauksessa esitettiin yhdistetyn lämmön ja kosteuden siirtymisen yhtälöt, joita COMSOL Multiphysics -simulointiohjelma käyttää matriisiyhtälöinä ratkaistaessa likiratkaisua numeerisilla menetelmillä elementtimenetelmällä. Lämmönsiirtymistä tapahtuu rakenteissa kolmella eri tavalla: Johtumalla eli konduktiolla, säteilemällä ja konvektiolla esimerkiksi ilmavirtauksen mukana. Lämpö siirtyy aina lämpimämmästä kappaleesta kylmempään kappaleeseen eli korkeammassa lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. Lämmön siirtymistä auringon säteilyllä ei lisätty työssä suoritettuihin simulaatioihin sen monimutkaisuuden ja sen rakennetta kuivattavan vaikutuksen perusteella. Rakenteissa oleva kosteus voi olla esiintyä vetenä, vesihöyrynä tai rakenteisiin sitoutuneena rakennekosteutena.

Kosteudensiirtyminen voi tapahtua rakenteissa karkeasti seuraavilla tavoilla: Vesihöyryn diffuusiolla, veden kapillaarisella siirtymisellä, konvektiolla tai veden painovoimaisella siirtymisellä. Veden painovoimaista siirtymistä ei tämän työn simuloinneissa otettu huomioon sen COMSOLista puuttumisen takia. Yleensä vesihöyryn diffuusio ja veden kapillaarinen siirtyminen tapahtuvat rakenteessa vastakkaisiin suuntiin. Vesihöyry siirtyy diffuusiolla korkeammasta suhteellisesta kosteuspitoisuudesta matalampaan suhteelliseen kosteudenpitoisuuteen eli yleensä rakennuksen sisältä ulospäin. Vesi taas yleensä siirtyy kapillaarisesti kosteasta kuivaan eli rakennuksen ulkoa sisälle päin. Yhdistetty lämmön ja kosteuden siirtyminen on monimutkainen ilmiö, jota on helpointa tarkastella elementtimenetelmän avulla.

COMSOL-simuloinnit suoritettiin 2D-malleilla. 2D-malleihin päädyttiin pitkien laskenta aikojen minimoimiseksi sekä mallien yksinkertaistamiseksi. 2D-malleilla vauriotapauksien simulointi osoittautui suhteellisen tehokkaaksi tavaksi. 3D-mallien luominen olisi turhaan hankaloittanut simulaatiomallien luomista ja vaikuttanut merkittävästi laskenta-aikoihin sekä laskennan konvergenssiin. Tämän työn simulaatioiden laskenta-ajat vaihtelivat käytössäni olevalla tietokoneella 3-17 [h] välillä. Pisin laskenta-aika oli betonisandwich-elementin vauriotapauksella, jossa elementtiverkon elementtien lisääntynyt määrä ja ilmavirtauksen lisääminen vauriokohtaan pitkittivät laskenta-aikaa merkittävästi. 3D-malleilla laskenta-ajat olisivat olleet huomattavasti pidempiä jo pelkästään matriisiyhtälöiden dimension kasvusta pois lukematta elementtiverkon suurempaa elementtien määrää. 3D-simulaatio olisi mahdollistanut elementtikohtaisen pystyilmavirtauksen lisäämisen tuuletusuraan tai tuuletusväliin, jolloin rakenteen kuivuminen olisi ollut tehokkaampaan. Tämän takia tutkitut 2D-mallit antoivat varmalla puolella olevia ratkaisuja.

Betonisandwich-rakenteen 2D-malli valittiin rakenteen vaakaurituksen kohdalta, jolloin simulointiin pystyttiin asettamaan ilmavirtaus vaakatuuletusuraan. Tutkittavassa betonisandwich-elementtirakenteessa oli ulkopinnasta ristiinuritettu mineraalivilla 20x30k300 [mm]. Mineraalivillan ristiinuritus on tutkitusti tehokas keino johtaa kosteutta pois rakenteesta ja kuivattaa rakennetta. Ristiinurituksen tavoitteena on jakaa ilmavirtaus laajalle alueelle koko mineraalivillan ulkopinnan alueella, jolloin kosteutta saadaan tehokkaasti tuuletettua pois koko lämmöneristyskerroksesta ja rakenteen sisäpuolelta.

Mineraalivillaeristeestä kosteus pääsee diffusoitumaan eristeen läpi uritukseen, josta kosteus kulkeutuu ilmavirtauksen mukana pois rakenteesta tuuletusputkien kautta. Lisäksi mahdollinen elementin sisäpuolelle päässyt vuotovesi pääsee poistumaan rakenteesta tehokkaasti. Tämän ansiosta voidaan olettaa, että leikkauksen ottaminen eri kohdasta kuin missä vaakauritus on, ei suurella todennäköisyydellä ole vaikutusta merkittävästi tuloksiin. Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun 2D-mallin vaakaleikkaus valittiin alumiinisen kiristinruuvien kohdalta, jolloin malliin saatiin luotua vaurio EPDM-kumiin ja kiristinruuvien väliin. Ulkoilman kosteus pääsi kyseisestä kohdasta vauriotapauksessa rakenteen sisään.

Ulkoilman olosuhteiksi simulaatioon valittiin Ilmatieteen laitoksen Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden ilmasto. Simulaatio suoritettiin eteläiselle julkisivulle. Sisäilman suhteellinen kosteus ja viistosade laskettiin erikseen Liitteiden 2 ja 3 mukaisesti. Sisäilman lämpötilaksi asetettiin vakioarvo 21 °C koko simulaation ajaksi. Simulaatioiden ja mallien reunaehdot ja rajoitukset asetettiin kappaleen 5.2.4 mukaisesti. Materiaaliominaisuuksina käytettiin suurimmaksi osaksi RIL 255-1-2014 ja COMSOLin materiaalikirjaston materiaaliominaisuuksia.

Elementtiverkkona käytettiin muunneltua kolmioelementtiverkkoa, jota minimoitiin herkkyystarkastelujen pohjalta. Laskenta suoritettiin vuoden ajalta tunnin aika-askeleella. Simulaatioiden ajamisessa ilmeni alkuvaiheissa ongelmia ajasta riippuvan ratkaisijan kanssa. Ongelmat saatiin ratkaistua kasvattamalla ajasta riippuvan ratkaisijan iteraatioiden lukumäärää adaptiivista aika-askelta kohti, jolloin laskennat saatiin vietyä loppuun asti ilman keskeytymisiä.

Rakenteiden tarkastelupisteet valikoituivat homehtumisherkkyyden ja kosteuden kondensoitumisen todennäköisyyden perusteella suurimmiksi osin paksun mineraalivillakerroksen ulkopuoliseen rajapintaan molemmissa rakenteissa. Rakenteissa homeen kasvua esiintyy yleensä kahden materiaalin välisessä rajapinnassa. Tutkituissa rakenteissa homehtumisherkin materiaali oli mineraalivilla, joka kuului homehtumisherkkyydsluokkaan HH3, VTT:n parannetun homemallin perusteella. Homeen kasvun kannalta suotuisat olosuhteet HH3 luokan materiaaleille saavutetaan, kun lämpötila vaihtelee välillä 0-50 °C ja suhteellinen kosteus on yli 85 %. Tutkituissa

rakenteissa parannetun homemallin mukainen homeindeksi ei saavuttanut kriittiseksi asetettua arvoa 1,0. Tämä tarkoittaa sitä, että suhteellinen kosteus ei ollut missään rakenteessa tarpeeksi pitkään yli 85 % suotuisella lämpötila-alueella.

Betonisandwich-elementin tulokset olivat odotetun mukaisia. Suhteellinen kosteus vaihteli lämpiminä kuukausina voimakkaasti. Tämä johtui pakotetusta tulostetusta tunnin aika-askeleesta, jonka COMSOL tulosti kuvaajiin. Pienen aikavälin liukuvan keskiarvon käyttö olisi poistanut maksimiarvoja ja sovittanut suoran paremmin hahmotettavaan muotoon. Toisaalta tuloksien esittäminen tässä työssä esitettyssä muodossa antoi tarkemman kuvan suhteellisen kosteuden ja lämpötilan muutoksista ajan funktiona. Betonisandwich-elementti toimi kosteusteknisesti hyvin vauriottomassa ja vauriollisessa tapauksessa simulaation aikana. Rakenteen havaittiin hiukan kuivuvan vuoden mittaisen simulaation aikana. Suhteellisen kosteuden arvot eivät olleet homehtumisherkkyiden kannalta riittävän pitkää aikaa kriittisellä tasolla. Lämpötilajakaumissa ei esiintynyt kylmäsiltoja.

Betonisandwich-elementin pystysauman vaurioituminen ei vaikuttanut lähes ollenkaan rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Homeen kasvun kannalta suotuisia suhteellisen kosteuden olosuhteita esiintyi mineraalivillakerroksen ulkopinnassa vain lyhytaikaisesti, jolloin rakennetta voidaan pitää parannetun homemallin perusteella kosteusteknisesti toimivana ja varmana rakenteena. Kyseistä rakennetta voidaan pitää tämän tutkimuksen perusteella kosteusteknisesti turvallisena ja toimivana vaihtoehtona korkeaan rakentamiseen, jossa julkisivuun kohdistuu voimakasta viistosaderasitusta, johtuen suuremmista tuulen nopeuden arvoista.

Kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun tulokset olivat vauriottomassa tapauksessa odotettuja. Rakenne toimi lämpö- ja kosteusteknisesti hyvin. Rakenne kuivui erinomaisesti simulaation aikana eikä homehtumisvaaraa ollut. Vauriotapauksissa kyseinen kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu ei kuitenkaan toiminut kosteusteknisesti toimivasti, vaan rakenteen havaittiin olevan yllättävän herkkä jo pienillekin vaurioille. Pelkkä vaurio sisäpuolella pellityksen ja alumiinipystyprofiilin välissä aiheutti rakenteeseen kosteuspitoisuuden kasvua. Kosteuden ei myöskään havaittu kuivuvan tai poistuvan rakenteesta vuoden mittaisen simulaation aikana. Rakenteen

molemminpuolinen vaurio, josta myös ulkoilman kosteus pääsi rakenteen paksuun mineraalivillakerrokseen, aiheutti suurempaa kosteuspitoisuuden kasvua kuin pelkkä vaurio rakenteen sisäpuolella. Vauriotapauksissa paksun mineraalivillakerroksen ulkopinnassa ja kuitusementtilevyn rajapinnassa suhteellinen kosteus ylitti talvikuukausina muutaman kerran hetkellisesti 100 % arvon. Tällöin materiaalien rajapinnassa oleva kosteus tiivistyi vedeksi viileämmälle pinnalle. Erityisesti vauriotapauksissa kosteutta kertyi odotetusti mineraalivillakerroksien ulkoreunojen ja kuitusementtilevyjen rajapintaan. Parannetun homemallin perusteella tarkastelupisteiden homeindeksi ei kuitenkaan saavuttanut maksiarvoa 1,0 eli toisin sanoen rakenteessa ei tapahtunut homeen kasvua tutkituissa kohdissa.

Tässä työssä käsiteltiin todennäköisimpiä betonisandwich-elementin ja kevyen järjestelmäjulkisivun vauriotapauksia ja niiden aiheuttamia vaikutuksia rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen verrattuna niiden vauriottomiin tapauksiin. Vauriottomissa tapauksissa molemmat rakenteet toimivat lämpö- ja kosteusteknisesti hyvin. Vauriotapauksissa betonisandwich-elementti toimi kosteusteknisesti paremmin kuin kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu, jossa havaittiin huomattavia eroja vauriottomaan tapaukseen verrattuna.

Tähän työhön valittu kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu on vain yksi lukuisista erilaisista valmistajien vaihtoehtoista. Useilta valmistajilta löytyy erilaisia vaihtoehtoisia rakenteita, joissa lämpö- ja kosteustekniset ongelmat on ratkaistu eri tavoilla. Suunnittelijan on tärkeää tunnistaa kyseisten rakenteiden ominaiset riskipaikat, ja mihin kyseisissä ratkaisuissa tulee kiinnittää erityisesti huomiota rakennetyypejä valittaessa. Tässä työssä tutkittu kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu on riskialtis jo pienillä vaurioilla, jolloin suunnitteluvaiheessa voitaisiin onnistuneesti todeta rakenne epäsoveltuvaksi korkean rakentamisen olosuhteisiin, ja valita toteutettavan kohteen rakenteeksi jo toimivaksi osoittautunut rakenneratkaisu.

Tutkimuksen perusteella betonisandwich-elementti osoittautui toimintavarmemmaksi rakenteeksi lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden osalta tutkituissa vauriotapauksissa. Betonisandwich-elementin pystysauman vaurioituminen ei aiheuttanut ongelmia rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Tuuletusura poisti pystysauman vaurion kautta

siirtyvää kosteutta tehokkaasti ulos rakenteesta, jolloin mineraalivillan suhteellinen kosteuspitoisuus ei noussut vauriottomaan rakenteeseen verrattuna.

Tuloksista ei pysty yhden vuoden mittaisen simulaation pohjalta tarkasti sanomaan, että kertyykö kosteutta lisää kevytrakenteiseen järjestelmäjulkisivuun vauriotapauksissa vai ei. Viiden vuoden simulaation ajaminen samoissa olosuhteissa ja samalla testivuodella varmistaisi asian. Kyseisen kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun kosteustekninen toimivuus osoittautui heikoksi jo tutkituilla pienillä vaurioilla. Tämän johdosta kyseinen kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu on riskipitoisempi ratkaisu toteutuksen osalta korkean rakentamisen olosuhteeseen. Työtekniiseen onnistumiseen toteutuksen ja asennuksen osalta on kiinnitettävä erityistä huomiota laadunvarmistamiseksi ja mahdollisten vaurioiden ehkäisemiseksi. Betonisandwich-elementti osoittautui kosteustekniseltä toimivuudeltaan toimintavarmemmaksi rakenteeksi kuin kevytrakenteinen järjestelmäjulkisivu. Betonisandwich-elementin kosteustekninen toimivuus ei vaarannu tutkitun vaurion kautta, kun taas kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun tutkitut vauriot heikentävät merkittävästi rakenteen kosteusteknistä toimivuutta ja altistavat rakenteen vaurioitumiselle.

Tutkimuksen tulokset ovat siinä mielessä merkittäviä, että ne paljastivat kyseisen kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun olevan herkkä jo pienillekin vauriolle, jolloin kyseisen rakenteen toteutukseen ja työtekniiseen onnistumiseen tulisi tulevaisuudessa kiinnittää erityistä huomiota. Betonisandwich-elementti on todettu aikaisemmissa tutkimuksissa lämpö- ja kosteusteknisesti toimivaksi rakenteeksi ja tämä tutkimus tukee kyseisiä johtopäätöksiä. Korkea rakentaminen tulee lisääntymään Suomen suurissa kaupungeissa tulevaisuudessa, joten tämän tutkimuksen tulokset antavat tärkeää tietoa julkisivurakenteen valintaa varten. Lisäksi tämä tutkimus selventää millaisia asioita julkisivurakenteen valinnassa pitää huomioida lämpö- ja kosteustekniseltä kannalta korkeaa rakentamista vastaavissa ilmasto-olosuhteissa. Tämän tiedon hyödyntäminen suunnittelussa auttaa hallitsemaan riskejä ja edistämään koko alan tuottavuutta sekä parantamaan asiakastyytyväisyyttä.

Tutkimuksessa saatuja tuloksia voidaan hyödyntää kehitystyön alla olevissa ja tulevaisuuden projekteissa helpottamaan ja varmentamaan päätöksentekoa. Työssä

luotuja COMSOL-simulaatiomalleja pystytään jatkossa käyttämään hyödyksi tutkittaessa erilaisten rakenteiden ja niiden vauriotapauksien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. COMSOL-simulaatiomallit ovat helposti muokattavissa, jolloin mallin luotiin käytettävä aika pysyy houkuttelevana aika-tuottavuus-odotuksen pohjalta.

Tutkimus antaa suunnittelijoille tärkeää ajantasaista tietoa kyseisten rakenteiden riskipaikoista, ja mihin erityisesti on tärkeää kiinnittää huomiota julkisivurakenteen valintaa tehdessä lukuisista markkinalla olevista eri vaihtoehdoista. Tutkimus tukee suunnittelijoiden päätöksentekoa, sekä pienentää julkisivuratkaisun valintaan ja toteutuksen valvontaan kohdistuvia riskejä. Tutkimus antaa tiedeyhteisöille uutta tietoa betonisandwich-elementin ja kevytrakenteisen järjestelmäjulkisivun lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta pienien vaurioiden alaisena, sekä mikä on mahdollisesti riittävä vaurio rakenteen kosteusteknisen toiminnan muuttumiseen kriittisesti. Tämä mahdollistaa nykyisten rakenteiden optimoinnin ja uusien parempien rakenteiden kehittämisen. Tutkimuksen tulokset eivät kuitenkaan ole yleistettävissä muille rakenteille kuin ainoastaan tutkimuksessa tutkituille rakenteille ja kyseisille vauriotapauksille kyseisissä ilmastollisissa olosuhteissa. Yleistettäessä tutkimuksen tuloksia eri rakennepaksumuksille, rakenteille ja materiaaliominaisuuksille pitää ottaa huomioon virhemahdollisuuksien kasvamisen todennäköisyys.

Betonisandwich-elementtien yksi huomionarvoinen riskitekijä, jota tämän tutkimuksen simulaatioissa ei otettu huomioon on rakenteen sisäkuorten liitoksien tiiviys. Betonisandwich-rakenteessa sisäkuoret toimivat höyrysulkuna, jolloin elementtien sisäkuorten liitoksenkin täytyy olla ilma- ja höyrytiiviitä. Elementtien sisäkuorten liitos toteutetaan yleensä betonivalusaumana, jolloin saumavalun onnistuminen on kriittinen edellytys rakenteen toimivuudelle. Jatkotutkimustarpeena olisi lisätä sisäkuoren vaurio betonisandwich-elementti -vauriomalliin, jolloin saataisiin sisäilman kosteuden vaikutus lisättyä simulaatioon.

Jatkotutkimusehdotuksena olisi suorittaa simulaatiot 3D-simulaatiomalleilla. Tällöin saataisiin mahdollisesti todenmukaisempia tuloksia rakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihteluista sekä lämmön ja kosteuden varastoitumiskyvystä. 3D-simulaatioiden suorittamiseen suositellaan laskentaan optimoitua tietokonetta laskenta-

aikojen minimoimiseksi. Toisena jatkokehitysehdotuksena olisi simuloida tuuletusraon ja -välin ilmavirtaus turbulenttisen ilmanvirtauksena, joka antaisi todennukaisemman kuvan ilmanvirtauksen käyttäytymisestä ja rakennetta kuivattavasta vaikutuksesta. Ilmeisenä jatkotutkimustarpeena olisi myös ajaa simulaatiot Jokioisen 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden ilmastolla. Tällöin saataisiin vertailutuloksia tässä tutkimuksessa suoritettuun Vantaan 2030 testivuoteen nähden. Vertailutuloksien saamiseksi ja tämän tutkimuksen tuloksien verifioimiseksi simulaatiot voitaisiin suorittaa myös toisella simulaatio-ohjelmalla, esimerkiksi WUFI:lla. Täydentävänä jatkotutkimustarpeena olisi tutkia tarkemmin vauriokohtien koon vaikutusta saatuihin tutkimustuloksiin. Tässä tutkimuksessa vaurioiden leveys valittiin todennukaisen vaurion sekä mahdollisen työteknisen virheen perusteella.

LÄHDELUETTELO

COMSOL, 2020. Heat and Moisture Transport in an Insulated Roof [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.comsol.com/model/download/619121/B1_Insulated_roof.pdf [viitattu 24.4.2020]. 16 s.

COMSOL, 2018. Heat Transfer Module User's Guide [verkkodokumentti]. COMSOL. Saatavissa: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf> [viitattu 2.5.2020]. 702 s.

Emporis, 2020. Standards, structures [verkkosivu]. Hampuri: Emporis. Saatavissa: <https://www.emporis.com/building/standard/3/high-rise-building> [viitattu 14.5.2020].

Granroth S, 2019. FEM-laskentaohjelman aikahistoria-analyysin hyödyntäminen korkeiden rakennusten tuulikuorman aiheuttaman värähtelyn mitoituksessa [verkkodokumentti]. Oulu: S. Granroth. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201911203116> [viitattu 5.2.2020]. 101 s.

Hallebrand E., Jakobsson W., 2016. Structural design of high-rise buildings [verkkodokumentti]. Lund, Ruotsi: Lund University. ISSN 0281-6679. Saatavissa: <http://www.byggmek.lth.se/fileadmin/byggnadsmekanik/publications/tvsm5000/web5213.pdf> [viitattu 5.2.2020]. 142 s.

Helsingin kaupunki, 2018. Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018 [verkkodokumentti]. Helsinki: Helsingin kaupunki. Saatavissa: https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/KORKEAN_RAKENTAMISEN_RAKENTAMISTAPAOHJE_OHJEKORTIT.pdf [viitattu 23.1.2020]. 87 s.

Ilmatieteen laitos, 2020a. Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet [verkkodokumentti]. Helsinki: Ilmatieteenlaitos. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet> [viitattu 24.2.2020].

Ilmatieteen laitos, 2020b. Tuuliselvitykset rakentamisen tueksi [verkkodokumentti]. Helsinki: Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuulikuorma> [viitattu 19.2.2020].

Kauppinen Timo, 2011. Rakennusten ilmapitävyys [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK110501.pdf> [viitattu 9.4.2020]. 9 s.

Kingspan, 2019. Tutkimus BSW-elementin kuivumisesta, White paper -artikkeli [verkkosivu]. Tampere: Kingspan Insulation Oy. Saatavissa: <https://www.kingspan.com/fi/fi-tuotteet/eristeet/thefactsmatter/moisturecontrolmatters/tutkimus-bsw-elementin-kuivumisesta> [viitattu 22.4.2020].

Kiviluoma Risto, 2007. Suomen korkeimman rakennuksen turvalliset rakennusratkaisut: tuulen vaikutus [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK070501.pdf> [viitattu 5.2.2020]. 3 s.

Korkean rakentamisen työryhmä, 2011. Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston asemakaavaosaston selvityksiä 2011:4 Korkea rakentaminen Helsingissä [verkkodokumentti]. Helsinki: Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto. ISSN: 1235-4104. Saatavissa: https://www.hel.fi/hel2/ksv/julkaisut/aos_2011-4.pdf [viitattu 22.1.2020]. 70 s.

Kuivaketju10, 2020. Toimintaohjeet, suunnittelu [verkkosivu]. Espoo: Rakentamisen Laatu RALA ry. Saatavissa: <http://kuivaketju10.fi/> [viitattu 17.3.2020].

Künzel Hartwig M., 1995. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components [verkkodokumentti]. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics. ISBN 3-8167-4103-7. Saatavissa: <https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzel%201995%20-%20Simultaneous%20Heat%20and%20Moisture%20Transport.pdf> [viitattu 12.2.2020]. 65 s.

Lahdensivu J., 2010. Betonijulkisivujen vaurioituminen [verkkodokumentti]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: <https://julkisivuyhdistys.fi/wp-content/uploads/2020/01/Beko2.pdf> [viitattu 12.5.2020]. 3 s.

Lehtoviita T., Laine E., Alitalo S., 2004. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille. Kosteus. [verkkodokumentti]. Rafnet-ryhmä. Saatavissa: http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf [viitattu 24.3.2020]. 74 s.

Lindberg Ralf, 2015. Rakennusosien rakennusfysikaalinen toiminta [verkkodokumentti]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK040302.pdf> [viitattu 26.2.2020]. 10 s.

Nieminen J. & Salonvaara M., 2003. Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyys [verkkodokumentti]. Espoo: VTT. VTT tiedotteita 2210, ISBN 951-38-6170-8. Saatavissa: <http://sites.routa-cms.fi/userData/60284/tiedostot/T2210.pdf> [viitattu 28.5.2020]. 71 s.

Ojanen T., 2009. SPU-eristeisten betonisandwich-elementtien uritustarve [verkkodokumentti]. Espoo: VTT. VTT-S-06111-09. Saatavissa: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/Haku?term=SPU-eristeisten%20betonisandwich-elementtien%20uritustarve> [viitattu 11.5.2020]. 8 s.

Olsson L., 2018. Driving Rain Tightness, Intrusion Rates and Phenomenology of Leakages in Defects of Façades: A New Calculation Algorithm [verkkodokumentti]. Gothenburg: Chalmers University of Technology. ISBN: 978-91-7597-813-0. Saatavissa: https://research.chalmers.se/publication/505630/file/505630_Fulltext.pdf [viitattu 23.6.2020]. 50 s.

Oulun rakennusvalvonta, 2014. Tiiveyskortti [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun kaupungin rakennusvalvonta. Saatavissa: <https://www.ouka.fi/documents/486338/2c940889-b59d-4e4c-8c99-663eff21847d> [viitattu 9.4.2020]. 2 s.

Outinen K., 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170782> [viitattu 4.2.2020]. 8 s.

Parviainen M., 2013. Korkeiden rakennusten toimiva julkisivu merenrantaolosuhteissa [verkkodokumentti]. Espoo: Metropolia Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63794/Korkeide.pdf?sequence=1> [viitattu 19.7.2020]. 88 s.

Pekkala V., Vikman K., 2009. Lasiseinät, lasikatot ja niiden liittymät ympäröiviin rakenteisiin [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK090401.pdf> [viitattu 7.2.2020]. 9 s.

Pitkäranta, M. (toim.), 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4626-8> [viitattu 8.5.2020]. 238 s.

RT 80-11202, 2016. Rakennuksen suojapellitykset. Helsinki: Rakennustieto, 23 s.

Rakentamisen kosteudenhallinta, 2020. Sandwich- ja kuorielementit [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.kosteudenhallinta.fi/index.php/fi/rakenteet/ulkoseinaet/sandwich-ja-kuorielementit> [viitattu 13.2.2020].

RakMK, 2018. Energiatehokkuus, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 3.3 Vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve. Helsinki: Ympäristöministeriö, 80 s.

RakMK, 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Ympäristöministeriö, 24 s.

RakMK, 2010. Rakennusten lämmöneristys. Rakennusosat ja rakenteiden ilmanpitävyys. Helsinki: Ympäristöministeriö, 10 s.

Rantala J., Leivo V., 2007. Rakenteiden ja liitosten rakennusfysiikkaa [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK070301.pdf> [viitattu 10.2.2020]. 9 s.

RIL, 1984. RIL 155 Lämmön- ja kosteudeneristys. Helsinki; Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y., 389 s. ISBN 951-758-044-4

Savolainen K., 2018. Lähes nollaenergiatasoisen toimistorakennuksen vaipparakenteiden rakennusfysikaalinen toimivuus [diplomityö]. Espoo: Aalto-yliopisto. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/30526/master_Savolainen_Kirsi_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 2.5.2020]. 122 s.

SFS-EN ISO 6946:2017, 2017. Rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönjohtavuus. Laskentamenetelmät. Helsinki: Suomen standarditoimisto SFS, 50 + 23 s.

SFS-EN ISO 15927-3, 2009. Rakennusten lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen. Säättietojen laskenta ja esittäminen. Osa 3. Pystypintojen viistosadeindeksin laskenta tuulen ja sateen tuntitiedoista. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 30 + 8 s.

SFS-EN 13830:2015, 2015. Julkisivujärjestelmät. Tuotestandardi. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry., 87 + 50 s.

SFS-EN 15026, 2007. Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 16 + 6 s.

Siikanen Unto, 2012. Rakennusten lämpö- ja kosteusfysikaalisia näkökohtia [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120401.pdf> [viitattu 4.2.2020]. 16 s.

Sisäilmayhdistys ry, 2008. Kosteuden siirtyminen [verkkodokumentti]. Espoo: Helsingin, Espoon ja Vantaan Terveelliset tilat, Sisäilmayhdistys ry. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Kosteuden-siirtyminen> [viitattu 18.2.2020].

Sisäilmayhdistys ry, 2020. Materiaalien ominaisuudet [verkkodokumentti]. Espoo: Sisäilmayhdistys ry. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Materiaalien-ominaisuudet> [viitattu 18.2.2020].

Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003. Asumisterveysohje [verkkodokumentti]. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö. ISBN 952-00-1301-6. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/71398/Opp200301.pdf?sequence=1> [viitattu 13.2.2020]. 94 s.

Tasauslaskentaopas 2018, 2017. Tasauslaskentaopas 2018 Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus [viitattu 10.4.2020]. 95 s.

the Wit, M., 2009. Heat, air and moisture in building envelopes [verkkodokumentti]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. Saatavissa: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/3903715/581200112862067.pdf> [viitattu 20.4.2020]. 201 s.

Time Berit, 1998. Hygroscopic Moisture Transport in Wood [verkkodokumentti]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology Department of Building and Construction Engineering. Saatavissa: <http://www.ivt.ntnu.no/docs/bat/bm/phd/AvhandlingBeritTime.pdf> [viitattu 19.2.2020]. 232 s.

Tuomainen J., 2015. Rakennuspellitysdetaljien yhdenmukaistaminen [verkkodokumentti]. Kuopio: Savonia-AMK. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93018/Tuomainen_Juho.pdf.pdf?sequence=1 [viitattu 12.5.2020]. 55 s.

Valjus, J., 2019. Korkea rakentaminen yleistyy – insinöörit uusien haasteiden edessä. *Betoni-lehti*, 3/2019, s. 70-77.

Vinha Juha, 2008. Rakennusfysiikan perussäännöt suunnittelussa ja rakentamisessa [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK080303.pdf> [viitattu 7.2.2020]. 17 s.

Vinha Juha, 2009. Rakennusten rakennusfysikaalisen suunnittelun ja rakentamisen periaatteet [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK090302.pdf> [viitattu 6.2.2020]. 20 s.

Vinha Juha, 2010. RIL 255-2010 Lämpö ja lämmön siirtyminen [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Saatavissa: <https://docplayer.fi/3499888-4-lampo-ja-lammon-siirtyminen.html> [viitattu 19.2.2020]. 88 s.

Vinha, J., 2014. 2.1.3 Rakenteiden lämpö- ja energiatekninen suunnittelu. Teoksessa: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. (toim.) RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, S. 29. ISBN 978-951-758-589-7

Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A. & Suonketo, J., 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa [verkkodokumentti]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti Nro 159. ISBN 978-952-15-2949-8. Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/frame-loppuraportti.pdf> [viitattu 10.6.2020]. 405 s.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P., 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona

[verkkodokumentti]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti 129. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ttt-2011041510640> [viitattu 21.4.2020]. 321 s.

WUFI, 2009. Moisture Transport in Building Materials, Computer Simulation with the WUFI Model [verkkodokumentti]. WUFI. Saatavissa: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics> [viitattu 25.3.2020].

WUFI-2D, 2007. On-line help for WUFI-pro 4.01 [verkkodokumentti]. WUFI. Saatavissa: https://wufi.de/download/WUFI41_help_e.pdf [viitattu 26.6.2020]. 279 s.

Ympäristöministeriö, 2016. Rakennesuunnittelijan kelpoisuusvaatimukset [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://www.pksrava.fi/doc/tulkintakortit/MRL-120f02A.pdf> [viitattu 20.2.2020]. 1 s.

Ympäristöministeriö, 2017. 1010/2017 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus [viitattu 21.2.2020]. 19 s.

LIITTEET

Liite 1. Materiaaliominaisuudet.

Liite 2. Sisäilman suhteellisen kosteuden laskenta.

Liite 3. Viistosateen laskenta.

Liite 1. Materiaaliominaisuudet. (1/14)

Ilma (COMSOL materiaalikirjasto: Air)

Taulukko L1.1. Betoni (RIL 255-1 2014, s. 424).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|--|----------------------|
| Lämmönjohtavuus $\lambda(w)$ | lineaarinen interpolaatio $\lambda(w)$ | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 2300 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 850 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | 130 | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | lineaarinen interpolaatio $D_w(w)$ | [m ² /s] |
| Hygroσκοoppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | lineaarinen interpolaatio $w(\phi)$ | [kg/m ³] |

Liite 1 (2/14)

Taulukko L1.2. Mineraalivilla (RIL 255-1 2014, s. 412).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|--|----------------------|
| Lämmönjohtavuus $\lambda(w)$ | lineaarinen interpolaatio $\lambda(w)$ | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 60 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 850 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | 1 | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | 0 | [m ² /s] |
| Hygroσκοoppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | lineaarinen interpolaatio $w(\phi)$ | [kg/m ³] |

Liite 1 (3/14)

Taulukko L1.3. Vaahtotiivistenauha, polyuretaanipohjainen (RIL 255-1 2014, s. 446).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|------|----------------------|
| Lämmönjohtavuus λ | 0,05 | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 70 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 1400 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | 60 | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | 0 | [m ² /s] |
| Hygroσκοoppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | 0 | [kg/m ³] |

Taulukko L1.4. Elastinen saumamassa (COMSOL materiaalikirjasto: Silicon).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|------|----------------------|
| Lämmönjohtavuus λ | 130 | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 2329 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 700 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | 2000 | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | 0 | [m ² /s] |
| Hygroσκοoppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | 0 | [kg/m ³] |

Liite 1 (5/14)

Taulukko L1.5. Polyeteenisaumanauha 15 mm (COMSOL materiaalikirjasto: Polyethylene).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|--|------|----------------------|
| Lämmönjohtavuus λ | 0,38 | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 930 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 1900 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | 2000 | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | 0 | [m ² /s] |
| Hygroσκοoppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | 0 | [kg/m ³] |

Taulukko L1.6. Kuitusementtilevy (RIL 255-1 2014, s. 410).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|--|----------------------|
| Lämmönjohtavuus $\lambda(w)$ | lineaarinen interpolaatio $\lambda(w)$ | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 1550 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 850 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | 127 | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | lineaarinen interpolaatio $D_w(w)$ | [m ² /s] |
| Hygroskooppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | lineaarinen interpolaatio $w(\phi)$ | [kg/m ³] |

Liite 1 (7/14)

Taulukko L1.7. EPDM-kumi (RIL 255-1 2014, s. 446).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|-------|----------------------|
| Lämmönjohtavuus λ | 0,25 | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 1150 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 1000 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | 10000 | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | 0 | [m ² /s] |
| Hygroskooppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | 0 | [kg/m ³] |

Liite 1 (8/14)

Taulukko L1.8. Lasi (RIL 255-1 2014, s. 448).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|---------|----------------------|
| Lämmönjohtavuus λ | 1,0 | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 2500 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 750 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | ääretön | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | 0 | [m ² /s] |
| Hygroskooppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | 0 | [kg/m ³] |

Taulukko L1.9. Alumiini (RIL 255-1 2014, s. 434).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|---------|----------------------|
| Lämmönjohtavuus λ | 160 | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 2700 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 880 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | ääretön | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | 0 | [m ² /s] |
| Hygroσκοoppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | 0 | [kg/m ³] |

Liite 1 (10/14)

Taulukko L1.10. Kitti, polyuretaanipohjainen (RIL 255-1 2014, s. 446).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|------|----------------------|
| Lämmönjohtavuus λ | 0,25 | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 1200 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 1800 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | 3000 | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | 0 | [m ² /s] |
| Hygroskooppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | 0 | [kg/m ³] |

Liite 1 (11/14)

Taulukko L1.11. Ilma (RIL 255-1 2014, s. 479).

| Materiaaliominaisuus | arvo | yksikkö |
|---|--------|----------------------|
| Lämmönjohtavuus λ | 0,0263 | [W/(mK)] |
| Kuiva irtotiheys ρ | 1,25 | [kg/m ³] |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | 1000 | [J/(kgK)] |
| Diffuusiovastuskerroin μ | 1 | [-] |
| Kapillaarikerroin $D_w(w)$ | 0 | [m ² /s] |
| Hygroskooppinen tasapainokosteus $w(\phi)$ | 0 | [kg/m ³] |

Liite 1. Lineaarisesti interpoloitavat materiaaliominaisuudet (12/14)

Lineaarisesti interpoloitavat materiaaliominaisuudet.

Lämmönjohtavuus kosteuspitoisuuden funktiona $\lambda(w)$. WUFI-ohjelman käyttämät arvot.
(Vinha ym. 2013, s. 363.)

Betoni

| w [kg/m ³] | λ [W/(mK)] |
|--------------------------|--------------------|
| 0 | 1,6 |
| 180 | 2,638 |

Mineraalivilla

| w [kg/m ³] | λ [W/(mK)] |
|--------------------------|--------------------|
| 0 | 0,040 |
| 10 | 0,040 |
| 20 | 0,041 |
| 50 | 0,043 |

Kuitusementtilevy

| w [kg/m ³] | λ [W/(mK)] |
|--------------------------|--------------------|
| 0 | 0,139 |
| 300 | 0,6 |

Liite 1 (13/14)

Kapillaarikerroin kosteuspitoisuuden funktiona $D_w(w)$.

Betoni (RIL 255-1 2014, s. 475).

| w [kg/m ³] | D_w [m ² /s] |
|--------------------------|---------------------------|
| 0 | 0 |
| 72 | $7,4 * 10^{-11}$ |
| 85 | $2,5 * 10^{-10}$ |
| 100 | $1,0 * 10^{-9}$ |
| 118 | $1,20 * 10^{-9}$ |

Kuitusementtilevy (RIL 255-1 2014, s. 476).

| w [kg/m ³] | D_w [m ² /s] |
|--------------------------|---------------------------|
| 0 | 0 |
| 271 | $2,62 * 10^{-8}$ |
| 280 | $3,28 * 10^{-8}$ |

Liite 1 (14/14)

Hygroσκοoppinen tasapainokosteuskäyrä (sorptio) $w(\phi)$.

Betoni (RIL 255-1 2014, s. 463). **Mineraalivilla** (RIL 255-1 2014, s. 469).

| ϕ [-] | w [kg/m ³] |
|------------|--------------------------|
| 0 | 0 |
| 0,35 | 25 |
| 0,5 | 28 |
| 0,7 | 45 |
| 0,9 | 65 |
| 0,95 | 105 |
| 0,96 | 120 |

| ϕ [-] | w [kg/m ³] |
|------------|--------------------------|
| 0 | 0 |
| 0,33 | 0,14 |
| 0,55 | 0,16 |
| 0,75 | 0,36 |
| 0,83 | 0,58 |
| 0,93 | 0,69 |
| 0,97 | 0,93 |

Kuitusementtilevy(RIL 255-1 2014, s. 467).

| ϕ [-] | w [kg/m ³] |
|------------|--------------------------|
| 0 | 0 |
| 0,35 | 65 |
| 0,5 | 72 |
| 0,7 | 80 |
| 0,8 | 90 |
| 0,9 | 100 |
| 0,95 | 110 |
| 0,98 | 150 |

Liite 2. Sisäilman suhteellinen kosteus. (1/4)

Sisäilman suhteellinen kosteuspitoisuus riippuu ulkoilman kosteuspitoisuudesta ja sisäilman kosteuslisästä. Sisäilman kosteuslisä taas riippuu ulkoilman lämpötilasta. Sisäilman suhteellinen kosteus ajan funktiona pystytään laskemaan rakennusfysikaalisen testivuoden avulla. Sisäilman suhteellinen kosteus lasketaan tunnin välein, jolloin data voidaan viedä COMSOLiin tekstitiedostona ja lineaarisesti interpoloida funktioksi.

Sisäilman suhteellisen kosteuden laskennassa tarvittiin lähtöarvoiksi Taulukon L2.1 mukaiset ominaisuudet. Ilmanpaineena käytettiin normaalia ilmakehän ilmanpainetta.

Taulukko L2.1. Sisäilman suhteellisen kosteuden laskennassa käytetyt parametrit.

| Parametri | Suure | Arvo [yksikkö] |
|--------------------------------|---------------|---------------------------------|
| Ilman tiheys | ρ_{ilma} | 1,2 [kg/m ³] |
| Ilmanpaine | p_{∞} | 101325 [Pa] |
| Sisäilman lämpötila | T_{in} | 21 [°C] |
| Ulkoilman lämpötila | T_{ext} | Vantaan 2030 testivuodesta [°C] |
| Ulkoilman suhteellinen kosteus | ϕ_{ext} | Vantaan 2030 testivuodesta [%] |

Sisäilman suhteellisen kosteuspitoisuuden laskennassa laskettiin ensiksi ulkoilman absoluuttinen kosteuspitoisuus sekä sisäilman absoluuttinen kosteuslisä. Nämä summaamalla saatiin sisäilman absoluuttinen kosteuspitoisuus, josta pystyttiin määrittämään sisäilman vesihöyryn osapaineen ja kyllästyspaineen avulla sisäilman suhteellinen kosteuspitoisuus.

Ulkoilman vesihöyryn kyllästysosapaine laskettiin kaavan (3) mukaisesti käyttäen lämpötilana T Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden ulkoilman lämpötilaa

$$p_{v.sat}(T_{out}) = 610,7 [Pa] * 10^{7,5 * \frac{T_{out} - 273,15 [K]}{T_{out} - 35,85 [K]}}. \quad (3)$$

Ulkoilman vesihöyryn osapaine laskettiin kaavan (4) mukaisesti käyttäen vesihöyryn kyllästysosapaineena edelle laskettuja arvoja, sekä suhteellisena kosteutena ϕ Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden arvoja

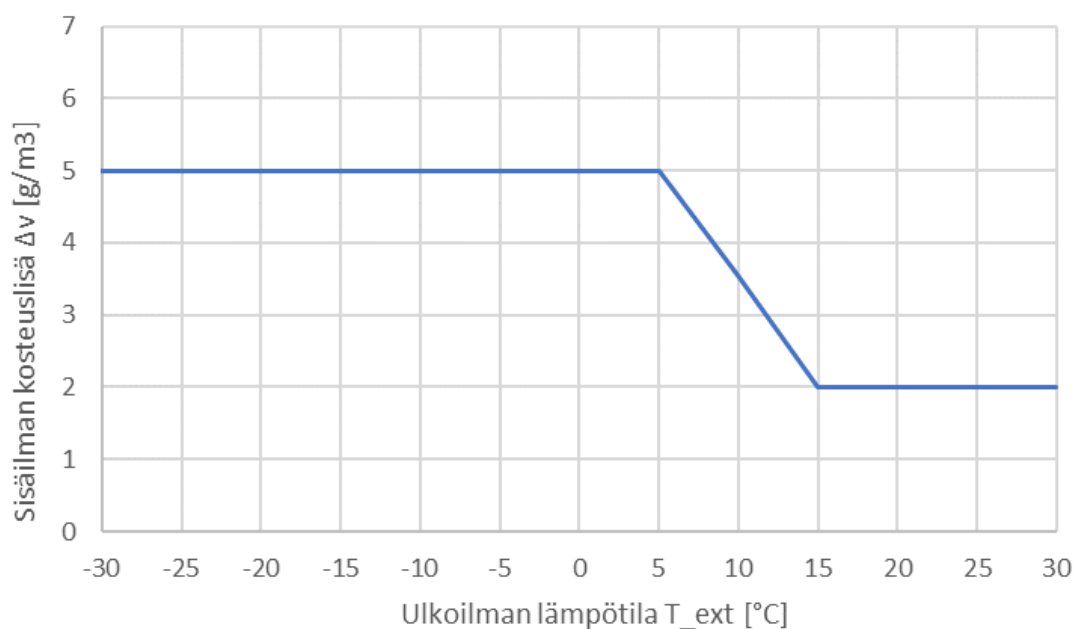
$$p_{v.out} = \phi * p_{v.sat}(T_{out}). \quad (4)$$

Liite 2 (2/4)

Ulkoilman absoluuttinen kosteuspitoisuus laskettiin kaavan (5) mukaisesti ulkoilman vesihöyryn osapaineen avulla

$$\varphi_{out} = \frac{0,62 \cdot p_{v.out}}{p_{\infty} - p_{v.out}}. \quad (5)$$

Sisäilman kosteuslisä laskettiin RIL 255-1 2014, s.71 mukaisesti. Tutkittava rakennus kuuluu kosteusluokkaan kaksi. Kuvassa L2.1 on esitetty kosteusluokkaan 2 kuuluvan rakennuksen sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot ulkolämpötilan funktiona.



Kuva L2.1. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot ulkolämpötilan funktiona kosteusluokassa 2 (mukaillen RIL 255-1 2014, s. 71).

Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot saatiin loogisten toimintojen avulla Excelissä seuraavasti:

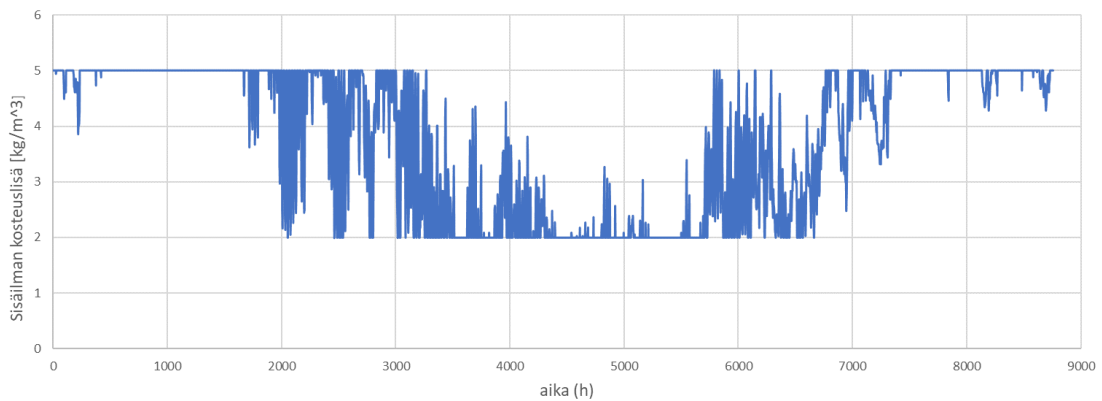
JOS $T_{ext} < 5$ °C, niin sisäilman kosteuslisä Δv [g/m³]: TOSI $\Delta v = 5$ [g/m³]
 EPÄTOSI $\Delta v = 0$ [g/m³].

JOS $T_{ext} > 15$ °C, niin sisäilman kosteuslisä Δv [g/m³]: TOSI $\Delta v = 2$ [g/m³]
 EPÄTOSI $\Delta v = 0$ [g/m³].

Liite 2 (3/4)

JOS $T_{ext} < 5\text{ °C}$ ja $T_{ext} > 15\text{ °C}$ ovat EPÄTOSIA, niin sisäilman kosteuslisä Δv [g/m^3] saadaan välille $5\text{ °C} < T_{ext} < 15\text{ °C}$ seuraavasti: TOSI $\Delta v = (6,5 - 0,3 * T_{ext})$ [g/m^3] EPÄTOSI $\Delta v = 0$ [g/m^3].

Kuvassa L2.2. on esitetty yllä mainitulla logiikalla lasketut sisäilman kosteuslisät tunnin välein, mitkä on lineaarisesti interpoloitu funktioksi. Kuvassa on Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden sisäilmankosteuslisä ajan funktiona.



Kuva L2.2. Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden sisäilmankosteuslisä.

Sisäilman kosteuslisä haluttiin yksikköön [kg/kg], jolloin suoritettiin muunnos

$$\varphi_{in.kosteuslisä} = \Delta v * \rho_{ilma}$$

Sisäilman absoluuttinen kosteuspitoisuus [kg/kg] saadaan summaamalla ulkoilman absoluuttinen kosteus sekä sisäilman absoluuttinen kosteuslisä

$$\varphi_{in} = \varphi_{out} + \varphi_{in.kosteuslisä}$$

Sisäilman absoluuttisen kosteuspitoisuuden avulla määritettiin sisäilman vesihöyryn osaja kyllästyspaine. Sisäilman vesihöyryn osapaine saatiin kaavan (5) avulla ja sisäilman vesihöyryn kyllästyspaine saatiin kaavan (3) avulla

$$p_{v.in} = \frac{\varphi_{in} * p_{\infty}}{(0,62 + \varphi_{in})} \text{ ja} \quad (5)$$

$$p_{v.sat}(T_{in}) = 610,7 \text{ [Pa]} * 10^{7,5 * \frac{T_{in} - 273,15 \text{ [K]}}{T_{in} - 35,85 \text{ [K]}}} \quad (3)$$

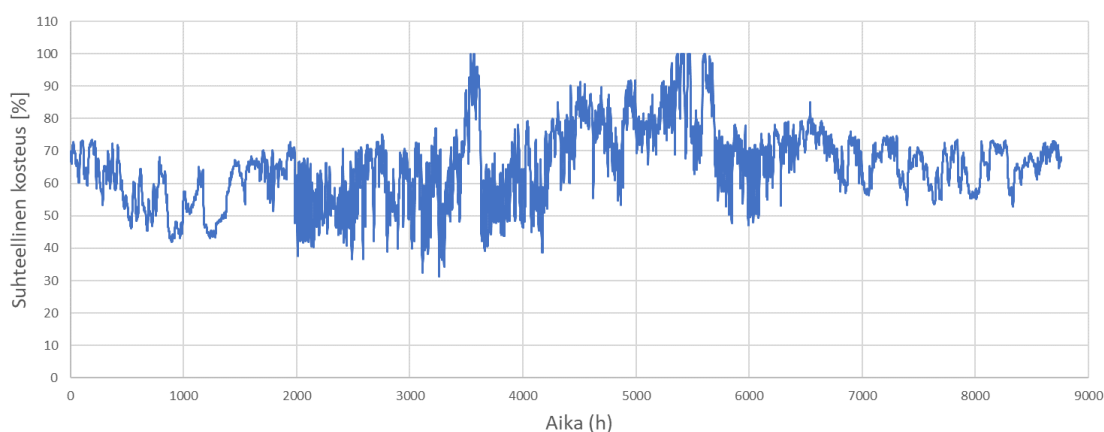
Liite 2 (4/4)

Sisäilman suhteellinen kosteus saatiin kaavasta (4) muotoon

$$\phi_{in} = \frac{p_{v.in}}{p_{v.sat}(T_{in})} * 100 \%. \quad (4)$$

Sisäilman suhteellisen kosteuden maksimiarvoksi asetettiin 99,9 %, koska suhteellisen kosteuden maksimiarvo on 100 %. Tämän arvon ylittyminen johtaa kosteuden kondensoitumiseen ilmaa kylmemmille pinnoille. Sisäilman kosteuden arvo ylitti noin 10 kertaa 100 %:n arvon.

Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden sisäilman suhteellinen kosteus on esitetty Kuvassa L2.3. Kuvaaja sovitettiin lineaarisesti tunnin välein laskettujen pisteiden pohjalta. Kyseistä sisäilman kosteutta käytettiin työn simulaatioissa.



Kuva L2.3. Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden sisäilman suhteellinen kosteus.

Liite 3. Viistosateen laskenta. (1/5)

Viistosade laskettiin standardin SFS-EN ISO 15927-3 mukaan. Laskennassa otettiin huomioon ympäristön maastonmuodot, rakennusta viistosateelta suojaavat esteet, rakennuksen muodot sekä tuulen suunta ja nopeus. Tuulen nopeus korkean rakentamisen olosuhteissa saatiin kertomalla rakennusfysikaalisen testivuoden datan tuulen nopeutta 1,5. Tätä voitiin pitää varmallalla puolella olevana approksimaationa. Simuloinnin tarkastelu suoritettiin eteläpuoleisille rakenteille.

Vapaa viistosade tarkoittaa häiriöttömästi putoavan sateen vaakakomponenttia Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden sade- ja tuuliolosuhteissa. Vapaa viistosade laskettiin

$$I_F = \frac{2}{9} v r^{\frac{8}{9}},$$

missä

I_F on vapaa viistosade testivuoden sade- ja tuuliolosuhteissa [mm/h],

v on tuulen nopeus [m/s] ja

r on vaakapinnalle osuva sateen määrä [mm/h].

Julkisivuille kohdistuva viistosade riippui julkisivun ilmansuunnasta. Tutkittavan rakenteen eteläiselle ilmansuunnalle tarvittiin vapaan viistosateen määrä kyseisessä ilmansuunnassa. Tämä otettiin laskennassa huomioon hetkellisen tuulen suunnan ja julkisivun normaalin välisen kulman kosinilla. Julkisivulle viistosade pystyi tulemaan vain julkisivun edestä eli julkisivupinnan normaalin suuntaisesti, tai viistosti maksimissaan 90 asteen kulmassa julkisivupinnan normaalia vastaan eli toisin sanoen julkisivupinnan suuntaisesti. Viistosateen normaalikomponentti julkisivulle laskettiin

$$I_A = I_F * \cos(D - \Theta),$$

missä

I_A on tuulen ja julkisivun normaalin suunnan huomioiva viistosateen määrä testivuoden olosuhteissa [mm/h],

Liite 3 (2/5)

I_F on vapaa viistosade testivuoden sade- ja tuuliolosuhteissa [mm/h],
 D on tuulen suunta pohjoisesta laskettuna [$^{\circ}$] ja
 Θ on tarkasteltavan julkisivunpinnan normaalin suunta pohjoisesta laskettuna eli 180 astetta [$^{\circ}$].

Kulma $\cos(D - \Theta)$ tarkoittaa siis tuulen suunnan ja pinnan normaalin välistä kulmaa. Kulmalle $\cos(D - \Theta)$ sallittiin vain positiivisia arvoja. Maksimifunktion avulla saatiin

$$\cos(D - \Theta)_{sallittu} = \text{MAX}(\cos(D - \Theta); 0).$$

Julkisivupinnalle osuva viistosademäärä riippuu vapaan viistosateen määrän lisäksi tuulen nopeuden erosta mittaus- ja rakennuspaikan välillä, rakennuspaikan maaston muodoista, rakennusta viistosateelta suojaavista esteistä sekä ilmansuunnasta. Julkisivupinnalle osuva kokonaisviistosateen määrä laskettiin

$$I_W = I_A C_R C_T O W,$$

missä

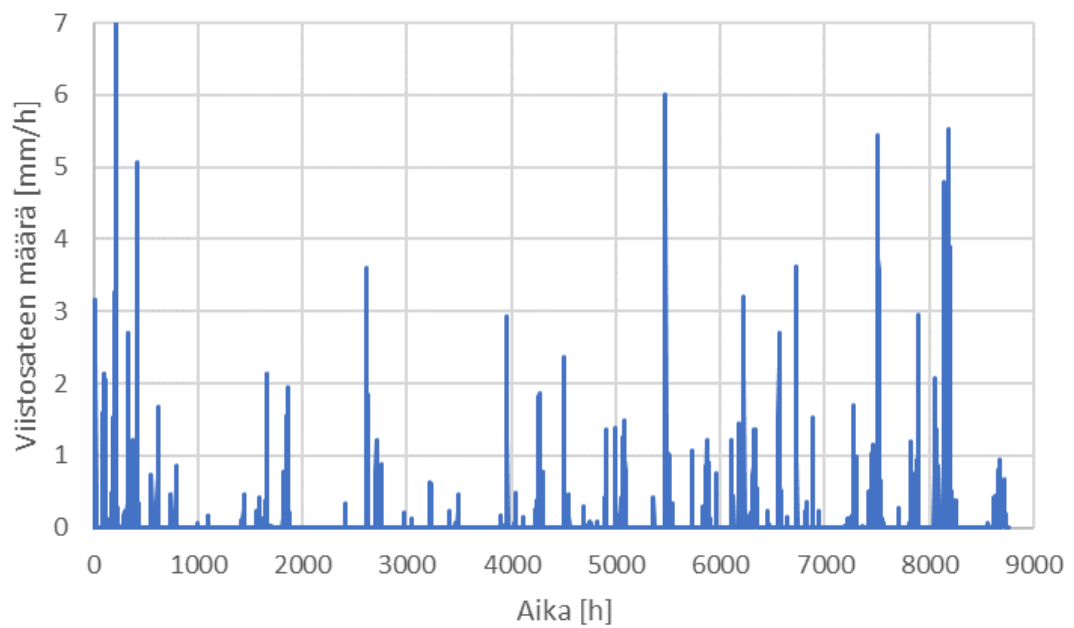
I_W on julkisivupinnalle osuva viistosateen määrä [mm/h],
 I_A on tuulen ja julkisivun normaalin suunnan huomioiva viistosateen määrä testivuoden olosuhteissa [mm/h],
 C_R on maaston rosoisuuskerroin [-],
 C_T on ympäröivän maaston pinnanmuotokerroin [-],
 O on ympäristön suojaisuuskerroin [-] ja
 W on pinnan geometriaan liittyvä seinäkerroin [-].

Kertoimille käytettiin standardin SFS-EN ISO 15927-3 mukaisia kaavoja ja määrittelyjä. Taulukossa L3.1 esitettiin laskennassa käytetyt kertoimet:

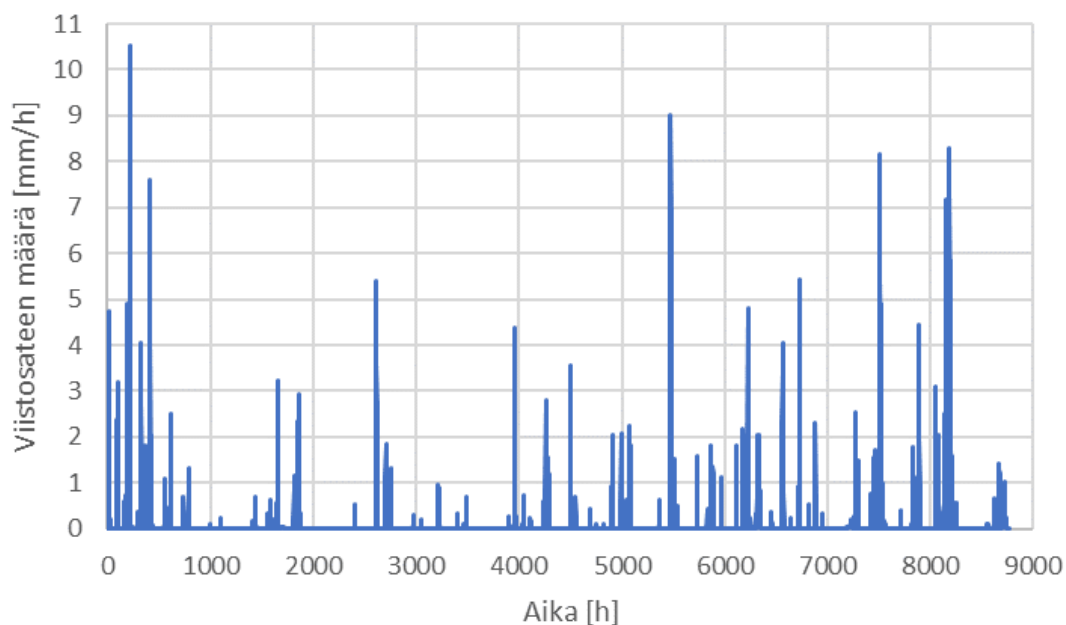
Taulukko L3.1 Julkisivupinnalle osuvan viistosateen laskennassa käytetyt kertoimet.

| Kerroin | Arvo |
|---------|------|
| C_R | 1,6 |
| C_T | 1,0 |
| O | 1,0 |
| W | 0,5 |

Julkisivupinnalle osuvaa kokonaisviistosateen määrää [mm/h] eri korkeuksilla vertailtiin kuvissa L3.1. ja L3.2. Y-akselin yksikkönä voitaisiin käyttää myös [kg/m²h].

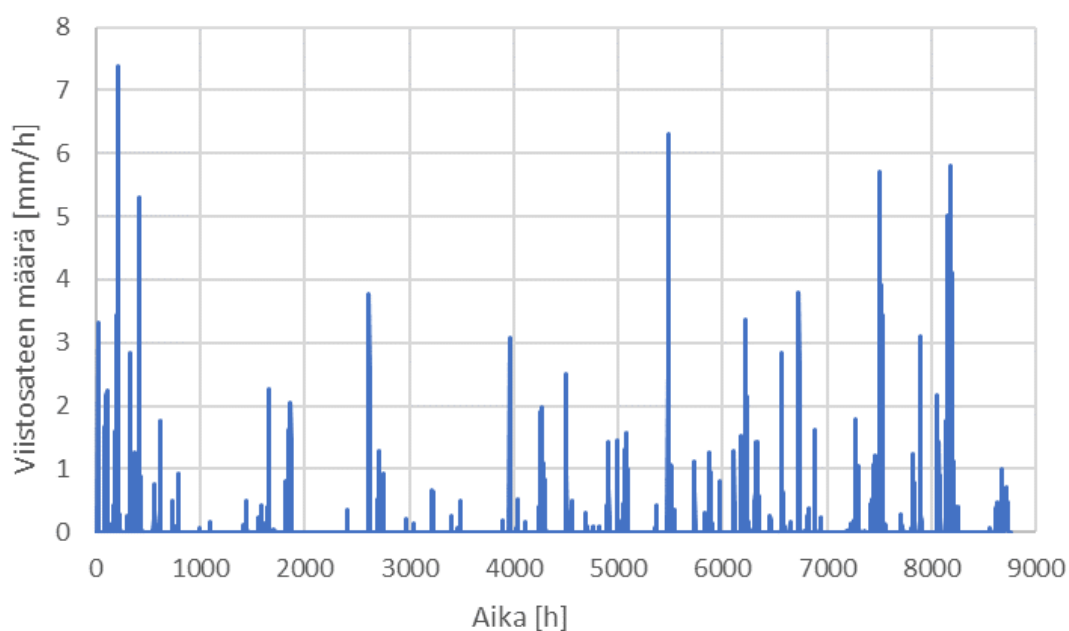


Kuva L3.1. Etelänpuoleisille julkisivuille osuva viistosateen määrä Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden ilmaston perusteella 10 metrin korkeudella.



Kuva L3.2. Etelänpuoleisille julkisivuille osuva viistosateen määrä Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden ilmaston perusteella 120 metrin korkeudella.

Julkisivulle osuvasta viistosateesta 70 % asetettiin siirtymään rakenteen sisään (WUFI-2D 2007, s. 27). Loput 30 % viistosateesta asetettiin kimpoamaan julkisivusta pois. Kuvassa L3.3. esitettiin COMSOLissa käytetty viistosadekuormitus, joka vastaa 70 % Kuvan L3.2. viistosateen määrästä. Viistosade vietiin COMSOLiin tunnin välein muuttuvana datana.



Kuva L3.3. Etelänpuoleiseen julkisivuun siirtyvä viistosateen määrä Vantaan 2030 rakennusfysikaalisen testivuoden ilmaston perusteella 120 metrin korkeudella.

Viistosateesta sisään siirtyvän kosteuden määrä pystysaumassa olevan reiän kohdalla laskettiin (Olsson 2018, s. 5-6) tutkimuksen perusteella. Sisään siirtyvän kosteuden määrä reiän kohdalla

$$G = \eta I_w H D$$

missä

G on kosteuslähde [kg/s],

η on viistosateen tunkeutumiskerroin [-],

I_w on julkisivupinnalle osuva viistosateen määrä [kg/(m²s)],

H on reiän korkeus[m] ja

D on reiän leveys [m].

Viistosateen tunkeumakerroin vaihtelee kokeellisten testien mukaan 0,5-2,0 % välillä (Olsson 2018, s. 8). Viistosateen tunkeutumiskertoimelle käytettiin tässä työssä yleisesti käytössä olevaa 1 % perusarvoa.